

DIPLOMARBEIT

Materialkataster des städtischen Gebäudebestandes als Instrument der kreislauforientierten Planung

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung
des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs
unter der Leitung von

Dipl.-Ing.in Dr.in techn. Julia Forster

Dipl.-Ing. Stefan Bindreiter, MSc

E280-04 Forschungsbereich Örtliche Raumplanung

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Architektur und Raumplanung

von

Aleksei Zakharov

11909843

Wien, am 22.05.2024



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

KURZFASSUNG

Die Entwicklung und das Wachstum der Städte bedingen einen erheblichen Verbrauch natürlicher Ressourcen und stellen eine bedeutende Belastung für die Umwelt dar. Insbesondere gehört der Bausektor in Wien zu den Hauptverursachern von Materialverbrauch und CO₂-Emissionen, und erzeugt zudem das höchste Abfallaufkommen in Österreich.

Die Kreislaufwirtschaft bietet einen Ansatz zur Bewältigung dieser Herausforderungen. Das Grundprinzip der Kreislaufwirtschaft ist die wertschöpfende Kreislaufführung eingesetzter Ressourcen, um den Abfall zu verringern und die Umweltauswirkungen von Produktion und Entsorgung zu reduzieren.

Die vorliegende Arbeit untersucht Strategien, Planungsmethoden und digitale Tools zur Umsetzung der Kreislaufprinzipien im Handlungsfeld der Stadtentwicklung und des Bausektors. Der Fokus liegt dabei auf Strategien und Methoden zur Planung und Nutzung der Bauwerke und Städte als Lagerstätten wiederverwendbarer und wiederverwertbarer Ressourcen.

Die Untersuchung der theoretischen Grundlagen und die Ergebnisse der Expert:inneninterviews zeigen, dass die kreislauforientierte Planung eine integrierte und maßstabsübergreifende Herangehensweise sowie strategische, regulative und technische Rahmenbedingungen erfordert.

Ein Tool zur Unterstützung dieses Planungsprozesses stellt der Materialkataster dar. Diese digitale Plattform erfasst die in Bauwerken der Stadt verbauten Materialien, wodurch das notwendige Wissen über Mengen und räumliche Verteilung der Materialressourcen im städtischen Gebäudebestand geschaffen wird. Durch die funktionale Analyse von drei bestehenden Plattformen – M-DAB, BIMstocks und Madaster – wird ein idealtypisches Funktionsmodell des Materialkatasters konzipiert, das optimale Funktionalität im Hinblick auf die identifizierten Aspekte und Aufgaben der kreislauforientierten Planung darstellt.

Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen werden die Handlungsempfehlungen zur Integration der kreislauforientierten Ansätze in die Planungspraxis formuliert sowie die Rolle des Materialkatasters bei der Umsetzung dieser Empfehlungen beleuchtet. Dadurch werden die potenziellen Wechselwirkungen zwischen den Maßnahmen und den Anwendungen des Materialkatasters aufgezeigt, die es ermöglichen, die ressourcenschonenden Ansätze in die Bauplanung und Stadtentwicklung zu integrieren.

ABSTRACT

The development and growth of cities lead to significant consumption of natural resources and pose a major environmental burden. In particular, the construction sector is one of the main contributors to material consumption and CO₂ emissions in Vienna, and it also generates the highest amount of waste in Austria.

Circular economy offers an approach to address these challenges. Its fundamental principle is the value-generating recycling of resources to reduce waste and to mitigate the environmental impacts of production and disposal.

This thesis explores strategies, planning methods and digital tools, which support the implementation of circular principles in urban development and construction sector. The specific focus lies upon strategies and methods for planning and utilizing buildings and cities as material stocks.

The theoretical research as well as the expert interviews show that the implementation of circular planning requires an integrated and cross-scale approach, as well as specific strategic, regulatory, and technical conditions.

The material cadastre is a tool to support such planning process. This digital platform captures the information about the materials used in the urban buildings, thus creating the necessary knowledge about the quantities and spatial distribution of material resources in the urban building stocks. Based upon the functional analysis of three existing platforms – M-DAB, BIMstocks, and Madaster – an idealized functional model of the material cadastre is designed to represent an optimal functionality in regard of the identified aspects and tasks of circular planning.

Furthermore, based on the research findings, policy recommendations for integrating circular approaches into planning practice are formulated, whereas the possible role of the material cadastre in implementing these recommendations is outlined. This demonstrates the potential interactions between the proposed measures and the material cadastre to enable the integration of resource-conserving approaches into construction planning and urban development.

DANKSAGUNG

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich während des Studiums unterstützt und motiviert haben.

Zuerst gebührt mein Dank Frau Drⁱⁿ Julia Forster und Herrn Dipl.-Ing. Stefan Bindreiter für die freundliche Betreuung, hilfreiche Denkanstöße und konstruktive Kritik während der Ausarbeitung meiner Diplomarbeit.

Des Weiteren bedanke ich mich bei den Expert:innen für die bereichernden Fachgespräche sowie für Ihre Zeit und Engagement.

Herzlichen Dank meiner Familie für die Ermöglichung dieses Studiums sowie für die stetige Unterstützung und Motivation.

Abschließend bedanke ich mich bei meinen Freund:innen und Studienkolleg:innen für die außerordentlich schöne gemeinsame Zeit während des Studiums.

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

BMK	Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie
CAD	Computer Aided Design
DIN	Deutsches Institut für Normung
BGF	Brutto-Grundfläche oder Bruttogeschossfläche
BIM	Building Information Modeling bzw. Building Information Model
BRI	Brutto-Rauminhalt
DGNB	Deutsches Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen
DI / DI ⁱⁿ	Diplom-Ingenieur/in
ebd.	ebenda
et al	et alii („und andere“)
etc.	et cetera
EU	Europäische Union
GIS	Geoinformationssysteme
IFC	Industry Foundation Classes
MA	Magistratsabteilung (Wien)
MGP	materieller Gebäudepass
o.J.	ohne Jahresangabe
ÖNORM	Österreichische Norm
PSS	Planungsunterstützungssystem
RBV	Recycling-Baustoffverordnung
RL	Richtlinie
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
UVP-G 2000	Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz 2000
u.a.	und andere
vgl.	vergleiche

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung	1
1.1. Ausgangslage, Motivation	1
1.2. Erkenntnisziele und Forschungsfragen	3
1.3. Raumplanerische Relevanz	4
1.4. Struktur und Methodik der Arbeit	6
1.5. Expert:inneninterviews	7
1.6. Kreislaufwirtschaft und Planungsprozesse der Stadtentwicklung	8
1.7. Glossar der Grundbegriffe	11
2. Urbane Stoffströme	14
2.1. Urbaner Metabolismus	14
2.2. Materialflüsse und CO ₂ -Emissionen in Wien	17
2.3. Bau- und Abbruchabfallaufkommen in Österreich	22
2.4. Bauabfallbehandlung in Österreich und Aspekte des Baustoffrecycling	24
2.5. Zwischenfazit zum Kapitel 2	26
3. Konzepte und Strategien der Kreislaufwirtschaft	27
3.1. Kreislaufwirtschaft: Definition, Strategien und Einordnung	27
3.1.1. Smart Klima City Strategie Wien: Aspekte der Kreislaufwirtschaft	29
3.1.2. Cradle-to-Cradle: Systemkonzept der Kreislaufwirtschaft	32
3.1.3. R-Strategien: Strategischer Rahmen der Kreislaufwirtschaft	34
3.2. Urban Mining: Kreislaufwirtschaft im anthropogenen Ressourcenlager	38
3.2.1. Urban Mining: Definition und Einordnung	38
3.2.2. Design for Urban Mining: Dimensionen der kreislauforientierten Planung	42
3.2.3. Handlungsfelder der kreislauforientierten Planung	44
3.3. Digitale Tools für kreislauforientierte Planung	47
3.3.1. GIS und Geodaten	48
3.3.2. Building Information Modelling	50
3.3.3. Materieller Gebäudepass	53
3.3.4. Materialkataster: Der Eckpfeiler des Urban Mining	58
3.4. Ansätze und Herausforderungen der kreislauforientierten Planung	66
3.4.1. Parameter und Indikatoren der Kreislauffähigkeit	66
3.4.2. Erkennung und Nutzung lokaler Potenziale	66
3.4.3. Aufbau einer Struktur zur Bauteil- und Materialvermittlung	69
3.4.4. Digitale Datengrundlage für die kreislauforientierte Planung	70
3.4.5. Anreize und Vorgaben für kreislauforientierte Planung	72

4. Materialkataster als Planungsunterstützungssystem.....	74
4.1. Grundlagen der Funktionsanalyse	74
4.1.1. Sichtweisen der Systembetrachtung.....	74
4.1.2. Darstellungsformen der Funktionsmodelle	75
4.2. Einordnung der Planungsunterstützungssysteme	76
4.3. Funktionsanalyse bestehender Materialkataster	77
4.3.1. Vorstellung digitaler Materialkataster	78
4.3.2. Erhebung der Information (information gathering)	80
4.3.3. Speichern und Abrufen der Information (information storage and retrieval)	84
4.3.4. Visualisierung der Information (information visualization)	87
4.3.5. Kommunikation der Information (information communication)	91
4.3.6. Analyse der Information (information analysis)	92
4.3.7. Modellierung der Information (information modelling).....	96
4.3.8. Schlussfolgerungen der funktionalen Analyse.....	100
5. Idealtypisches Modell des Materialkatasters.....	103
5.1. Konzeption eines idealtypischen Materialkatasters	103
5.2. Struktur und Aufbau des Referenzmodells	104
5.2.1. Datenbeschaffung zur Erstellung des Materialkatasters	106
5.2.2. Funktionen der Datenverwaltung	109
5.2.3. Analytische Funktionen	110
5.2.4. Funktionen der Visualisierung und Kommunikation	113
6. Handlungsempfehlungen für kreislaforientierte Planung	115
6.1. Empfehlungen zur Etablierung kreislaforientierter Planungsansätze	115
6.2. Indikatoren der Kreislauffähigkeit in der Bauordnung verankern	116
6.3. Kriterien der Kreislaufwirtschaft in die UVP integrieren	118
6.4. Regulatorische Verankerung des materiellen Gebäudepasses	119
6.5. Erhöhung des CO ₂ -Preises	120
6.6. Kreislaforientierte Kriterien in den öffentlichen Ausschreibungen.....	121
6.7. Kreislaufprinzipien in den Planungsprozess integrieren	122
6.8. Monetäre Anreize für kreislaforientiertes Planen und Bauen.....	123
7. Fazit und Ausblick	125
8. Quellen	130

1. EINLEITUNG

1.1. Ausgangslage, Motivation

Städte sind dynamische Systeme, die kontinuierlich wachsen und sich verändern. Mit der Entwicklung der Städte sowie mit der damit unmittelbar verbundenen Bauwirtschaft gehen enorme Materialflüsse sowie ein erheblicher Materialverbrauch und CO₂-Ausstoß einher. Die daraus resultierenden negativen Umwelteffekte sowie die effizienten Möglichkeiten deren Verringerung stellen aktuell eine der zentralen Problemstellungen der Stadtentwicklung und der Baubranche dar. Kreislaufwirtschaft und Urban Mining sind die Begriffe, die in jüngster Zeit vor dem umweltpolitischen Hintergrund vermehrte Aufmerksamkeit im stadtplanerischen und bauwirtschaftlichen Diskurs erfahren.

Die Kreislaufwirtschaft als ein Produktions- und Verbrauchsmodell zielt darauf ab, die bestehenden Materialien und Produkte so lange wie möglich im Wirtschaftskreislauf zu halten, indem diese wiederverwendet, repariert oder recycelt werden. Dieser Ansatz steht im Gegensatz zum bisher herrschenden linearen Wirtschaftsmodell, das auf hohen Mengen billiger, leicht zugänglicher Materialien und Energie beruht und demzufolge endliche Ressourcen ausnutzt, sowie erhebliche Abfallmengen produziert (*Europäisches Parlament, 2023*).

Nach den Angaben vom Umweltbundesamt und des BMK, ist die Baubranche in Österreich für etwa 75% (Bau- und Abbruchabfälle zzgl. Aushubmaterialien) des Abfallaufkommens (*Umweltbundesamt, 2019*), 8% des CO₂-Fußabdruckes und 14% des Materialfußabdruckes (*Eisenmenger et al. 2020: S. 8*) verantwortlich. Zugleich übertrifft die nationale Recyclingquote für Bau- und Abbruchabfälle mit 93% den von der EU-Abfallrahmenrichtlinie (RL 2008/98/EG) für nicht-gefährliche Bau- und Abbruchabfälle festgelegten Wert von 70% bei weitem (*Umweltbundesamt, 2019: S. 168*).

Vor diesem Hintergrund lässt sich der Fokus der Kreislaufwirtschaft in Bezug auf die Stadtentwicklung und Baubranche nicht so sehr als Steigerung einer bereits hohen Recyclingquote der Bauabfälle interpretieren, sondern als prinzipielle Abfallvermeidung, sowie als dauerhafte und wertschöpfende Kreislaufführung der im Bau verwendeten Ressourcen.

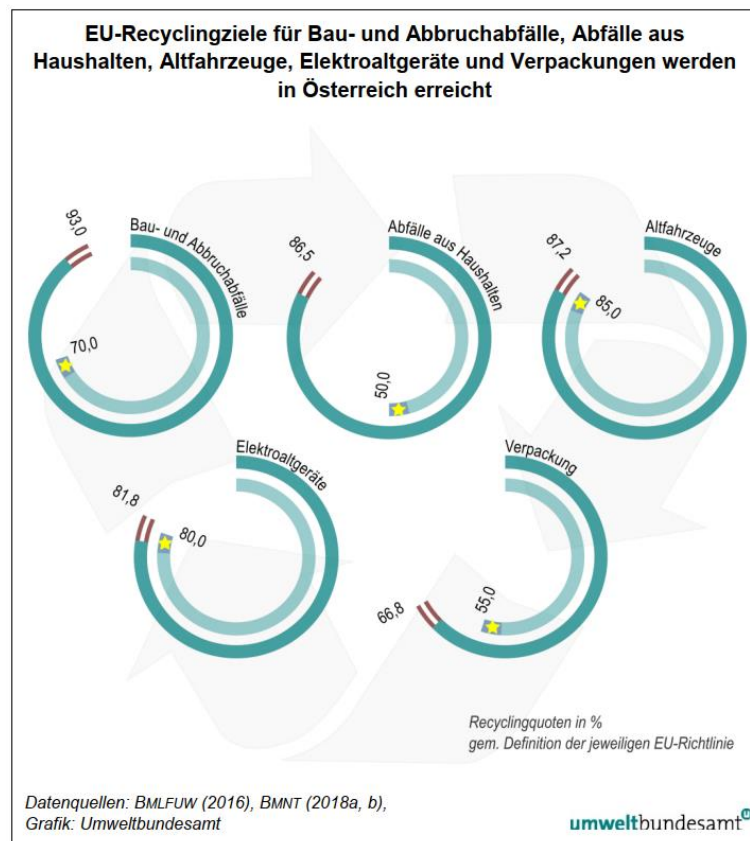


Abbildung 1: EU-Recyclingziele für verschiedene Abfallfraktionen und Recyclingquoten in Österreich im Jahr 2016 u. 2018. Quelle: Umweltbundesamt, 2019: S. 168

Die Smart Klima City Strategie der Stadt Wien verfolgt das Ziel, bis 2040 die Wiederverwendbarkeit von mindestens 70% der Bauelemente, -produkte und -materialien aus Abrissgebäuden und Großumbauten sicherzustellen. Bis 2050 sollen zudem 100% der nicht vermeidbaren Abfälle verwertet werden (*Stadt Wien, 2022: S. 42-43*). Die Maßnahmen zur Umsetzung dieses Ziels greifen in verschiedenen Bereichen, wobei der Gebäudesektor und die Kreislaufwirtschaft wichtige Handlungsfelder darstellen. Im Besonderen zielt die Smart Klima City Strategie darauf ab, Wien als Materiallager zu gestalten: Neue Gebäude sollen so geplant und gebaut werden, dass die eingesetzten Baumaterialien wiederverwendet oder wiederverwertet werden können. Gleichzeitig sollen im Sinne des Urban Mining (*vgl. Kapitel 3.2*) nutzbare Baumaterialien im bestehenden Gebäudebestand erfasst, erschlossen und verwertet werden (*ebd.: S. 60, S. 78*).

Eine der wesentlichen Voraussetzungen für die Umsetzung dieser Konzepte ist die Verfügbarkeit von Informationen, welche Materialien in welchen Mengen, an welchen Orten und zu welchem Zeitpunkt vorhanden sind (*Luger & Dorau, 2021: S. 32*). Eine technische Lösung bietet hierfür ein Materialkataster, der anhand verschiedener Methoden „die Größe und Zusammensetzung von Materiallagern in Bauwerksbeständen und deren zeitliche Veränderungen“ erfassen und abbilden lässt (*Schiller et al., 2022: S. 25*). In diesem Zusammenhang entsteht das Forschungsinteresse, die mögliche

Rolle des Materialkatasters in der kreislauforientierten Stadt- und Gebäudeplanung näher zu untersuchen.

Diese Arbeit konzentriert sich auf zwei wesentliche Dimensionen.

Die strategisch-planerische Dimension umfasst die Einordnung der Kreislaufwirtschaft in die Stadtentwicklung sowie die Untersuchung von Ansätzen und Herausforderungen der kreislauforientierten Planung in diesem Kontext.

Die technische Dimension umfasst die funktionale Analyse drei bestehender Materialkataster-Plattformen und darauf basierend die Konzeption eines idealtypischen Modells des Materialkatasters. Dieses Modell soll die optimale Funktionalität des Materialkatasters als Tools zur Unterstützung kreislauforientierter Planungsansätze abbilden. Denn trotz eines umfassenden Wissensbestandes zur Theorie der Kreislaufwirtschaft und kreislauforientierten Planung sowie der Verfügbarkeit einschlägiger digitaler Technologien, stellt die Implementierung der darauf aufbauenden Ansätze nach wie vor eine Herausforderung für die Praxis dar.

1.2. Erkenntnisziele und Forschungsfragen

Das Forschungsziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Ansätze, Herausforderungen und notwendigen Rahmenbedingungen der kreislauforientierten Planung zu beleuchten, sowie die Bedeutung des Materialkatasters in diesem Kontext zu erkennen.

Die Arbeit folgt hierbei den Ansatz, sowohl die planungsstrategischen als auch die umsetzungsbezogenen Aspekte des Themas zu betrachten. Die Ausarbeitung der Fragestellungen nimmt den Bezug auf Wien und Österreich, um die Forschung in ein reales räumliches, regulatives, und normatives Umfeld zu setzen und praxisrelevante Rückschlüsse ziehen zu können.

Der Arbeit liegt folgende These zu Grunde:

Die Integration eines Materialkatasters in den Planungsprozess ist eine wichtige Voraussetzung für die Etablierung der kreislaufgerechten Bauwirtschaft und Stadtentwicklung.

Darauf aufbauend wurden drei Forschungsfragen zur Überprüfung der These formuliert:

Welche Bedeutung hat Kreislaufwirtschaft für die ressourcenschonende und umweltgerechte Stadtentwicklung und Bauwirtschaft?

Um diese Frage zu beantworten wird der Überblick über die theoretischen Grundlagen zu urbanen Stoffströmen und Kreislaufwirtschaft gegeben sowie eine Analyse der Statistik zu Materialströmen, Materialverbrauch und CO₂-Emissionen des Bausektors in Wien und Österreich vorgenommen.

Darauf aufbauend werden die Rückschlüsse über die Rolle der Kreislaufwirtschaft hinsichtlich ressourcenschonender und umweltgerechter Stadtentwicklung gezogen sowie die wichtigen Aspekte in diesem Kontext beleuchtet.

Welche Ansätze und Tools lassen die Kreislaufwirtschaft in der Stadt- und Gebäudeplanung implementieren?

Diese Frage zielt darauf ab, die Strategien und Ansätze der kreislauforientierten Planung, sowie die digitalen Tools zu deren Unterstützung zu untersuchen. Damit werden die umsetzungsbezogenen Aspekte des Themas sowie die damit einhergehenden Herausforderungen beleuchtet, um die theoretischen Grundlagen mit praxisrelevanten Erkenntnissen zu ergänzen.

Über welche Funktionen und Eigenschaften sollte ein Materialkataster als Planungsunterstützungssystem aufweisen?

Zur Beantwortung dieser Fragestellung werden im ersten Schritt drei bestehender Materialkataster-Plattformen hinsichtlich ihrer Funktionalität analysiert. Darauf aufbauend wird ein idealtypisches Modell eines Materialkatasters konzipiert, um dessen optimale Funktionalität als Planungsunterstützungssystem in Hinblick auf die zuvor beleuchteten Ansätze und Herausforderungen der kreislauforientierten Planung abzubilden und zu beschreiben.

Was sind die erforderlichen Rahmenbedingungen für die Etablierung der kreislauforientierten Planung?

Diese Frage konzentriert sich auf die Identifikation und Ausformulierung der erforderlichen regulativen, normativen und technologischen Maßnahmen zur Integration der kreislauforientierten Ansätze in die Planungspraxis. Hierbei werden auch die mögliche Rolle des Materialkatasters in diesem Kontext diskutiert sowie die zu erwartenden Auswirkungen der Maßnahmen auf den Planungsprozess abgeschätzt.

1.3. Raumplanerische Relevanz

Die steigende Urbanisierung und einhergehende Bautätigkeit zählen weltweit zu einer der Ursachen des zunehmenden Rohstoffkonsums und der wachsenden CO₂-Emissionen. Vor diesem Hintergrund stellt die Stadtentwicklung ein wichtiges Handlungsfeld für Ressourcenschutz in urbanen Räumen dar (*Verbücheln et al. 2021: S. 8*). Die Planungsinstrumente im Sinne von Plänen, Konzepten und Methoden (*Stadtwende, 2023*) können somit direkt oder indirekt den Einfluss auf die Stoffströme nehmen, die sich auf diverse natürliche Ressourcen und ökologische Systeme

auswirken (Verbücheln et al. 2021: S. 8, S. 13). Die fortschreitende Digitalisierung, insbesondere im Sinne von Smart City Strategien, erweitert dabei das planerische Instrumentarium um technische Komponenten wie digitale Tools, die eine energie- und ressourcenschonende Gestaltung der Städten und Gemeinden unterstützen können (Smart City Charta, 2021: S. 10).

Zusammenhang zwischen Maßnahmen im urbanen Raum und natürlichen Ressourcen

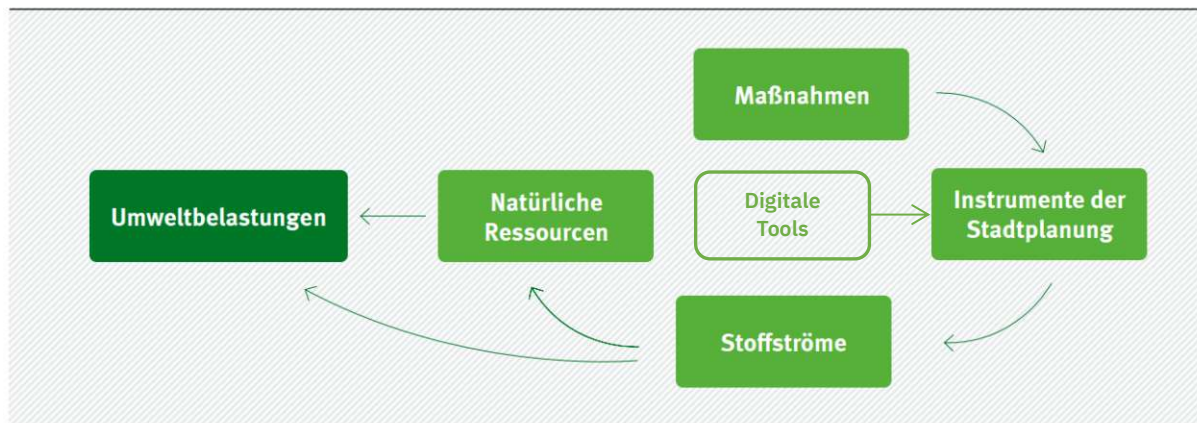


Abbildung 2: Zusammenhang zwischen Maßnahmen im urbanen Raum und natürlichen Ressourcen. Quelle: Verbücheln et al. 2021: S. 13, ergänzt durch eigene Darstellung: Prozesselement „Digitale Tools“

Im Spannungsfeld der Ressourcenknappheit, Stadtplanung und Digitalisierung rückt die kreislauforientierte Planung als Ansatz in den Fokus, die Stadtentwicklung und die damit einhergehende Bautätigkeit nach Prinzipien der Kreislaufwirtschaft ressourcen- und umweltschonend umzugestalten. Dabei ermöglichen verschiedene planerische Methoden die durch Städtebau entstehenden Stoffströme zu reduzieren, sowie die Gebäude als weaternutzbare Strukturen und langfristige Materiallager zu errichten (Achatz et al., 2021: S. 6). Diese Methoden setzen auf verschiedenen Maßstabsebenen an und zielen darauf ab, die am Bauplatz vorhandenen Ressourcen wie Böden, Aushub und Flächen effizient zu verwenden, sowie die langfristige Nutzung, Wiedergewinnbarkeit und qualitätsvolle Recycling von Baumaterialien und Bauteilen zu fördern (Hillebrandt, 2018: S. 10-14; Achatz et al., 2021: S. 24-29). Die Implementierung dieser Ansätze im Bauwesen bietet den Städten eine Möglichkeit, sich in neuartige selbstreproduzierende Rohstoffquellen zu verwandeln, den Ressourcenverbrauch zu reduzieren sowie durch kumulative Wirkung als Gesamtsystem einen wichtigen Beitrag zur Ressourcenschonung zu leisten (Stadt Wien, o.J.; Heisel & Hebel, 2022: S. 22; Hillebrandt, 2018: S. 10).

Eine der wesentlichen Voraussetzungen dafür sind die Informationen über die Verortung, Qualität und Zeitpunkt der Verfügbarkeit von im Gebäudebestand verbauten Baustoffen und Bauteilen (Luger & Dorau, 2021: S. 32). Ein digitales Instrument zur Herstellung dieser Datengrundlage bietet ein digitaler Materialkataster, der die relevanten Daten zur materiellen Zusammensetzung des

Gebäudebestandes systematisch erfassen und zentral speichern kann (Brunner & Kral, 2013: S. 251-252). Die Funktionalität des Materialkatasters kann die Entscheidungsfindung auf unterschiedlichen Ebenen der kreislaforientierten Planung unterstützen, beispielsweise bei der Identifikation von Recyclingpotenzialen des Gebäudebestandes oder der Bewertung der materialinduzierten Emissionen. Damit können informierte Entscheidungen hinsichtlich einer effizienten Ressourcennutzung in verschiedenen Planungsprozessen getroffen werden, wodurch ein Betrag zur ressourcenschonenden Stadtentwicklung geleistet werden kann (Bindreiter et al., 2022: S. 61; Schiller et al., 2022: S. 238-251).

Aus diesem Zusammenhang heraus ergibt sich die planerische Relevanz der vorliegenden Arbeit. Die funktionale Analyse von Materialkatastern und Entwicklung eines Referenzmodells liefert Verständnis über den Aufbau, Funktionsweise und Anwendungsfälle dieses Tools. Die Untersuchung der Herausforderungen der kreislaforientierten Planung und die darauf aufbauende Formulierung der Handlungsempfehlungen beleuchtet die notwendigen Rahmenbedingungen für die Integration von kreislaforientierten Planungsansätzen in die Praxis. Die gewonnenen Erkenntnisse schaffen somit ein Bindeglied zwischen dem theoretischen Rahmen der Kreislaufwirtschaft und der praktischen Implementierung deren Ansätze in den vielfältigen Planungsprozessen der Stadtentwicklung.

1.4. Struktur und Methodik der Arbeit

Die Struktur der vorliegenden Arbeit folgt dem Ansatz, den Untersuchungsgegenstand von der theoretischen bis hin zur praktischen Dimension zu betrachten. Dabei wird der Fokus von der Strategie und Planung schrittweise auf die Technologie und Umsetzung verlegt, um einen umfassenden Überblick über die Theorie und Praxis der kreislaforientierten Stadtentwicklung zu geben.

Im Kapitel 2 werden auf Basis von Fachliteratur und statistischen Daten für Wien und Österreich die theoretischen Grundsätze erarbeitet. Hierbei werden die Themen der urbanen Stoffströme und der erheblichen Wirkung der Bautätigkeit auf deren Volumen und Umwelteffekte, sowie die Rolle der Kreislaufwirtschaft in diesem Zusammenhang beleuchtet.

Auf Basis der weiterführenden Literaturrecherche werden im Kapitel 3 die systemischen Konzepte der Kreislaufwirtschaft dargelegt. Daran anknüpfend wird die Smart Klima City Strategie der Stadt Wien analysiert, um relevante strategisch-planerische Maßnahmen und digitale Instrumente zur Implementierung der Kreislaufwirtschaft in der Stadtentwicklung zu identifizieren. Auf Grundlage dieser Analyse wird der Fokus auf die konkreten Planungsmethoden und digitalen Tools gerichtet, die im Kontext der Vorgaben der Smart Klima City Strategie in Frage kommen. Hierbei wird insbesondere die Bedeutung des Materialkatasters als eines wichtigen Tools für die Unterstützung

der kreislauforientierten Planung aufgezeigt. Um die weitere Untersuchung der Rolle des Materialkatasters als Planungstools in einen realen Kontext zu setzen, werden auf Basis der qualitativen Expert:inneninterviews Ansätze und Herausforderungen der kreislauforientierten Planung identifiziert und schwerpunktmäßig gegliedert.

Im Kapitel 4 wird die funktionale Analyse von drei Materialkataster-Plattformen – M-DAB, BIMstocks und Madaster – vorgenommen. Diese Plattformen werden dabei als Planungsunterstützungssysteme (PSS) betrachtet und hinsichtlich deren Aufbau, Funktionen, und Datenstruktur untersucht. Als Analyserahmen dienen dabei sechs Grundfunktionen der PSS nach Vonk (2006). Die Plattformen werden in Bezug auf die Ausgestaltung dieser Grundfunktionen untersucht und verglichen, um das Verständnis über die Funktionalität dieser Tools für die kreislauforientierte Planung zu entwickeln.

Auf Grundlage dieser Analyse sowie im Hinblick auf die identifizierten Ansätze und Herausforderungen der kreislauforientierten Planung wird im Kapitel 5 ein idealtypisches Modell eines Materialkatasters entwickelt. Damit wird das Konzept einer optimalen Datenstruktur und Zusammensetzung der Funktionen des Materialkatasters hinsichtlich der möglichst effizienten Anwendung in der Praxis aufgezeigt. Dabei werden die Kernfunktionen, deren Beziehungen und Datenfluss, sowie Datenoutputs grafisch dargestellt und textlich beschrieben.

Im Kapitel 6 werden die Handlungsempfehlungen zur Bewältigung aktueller Herausforderungen bei Integration kreislauforientierter Planungsansätze in die Planungspraxis erarbeitet. Die Grundlagen dazu bilden einerseits die Erkenntnisse aus den Expert:inneninterviews bezüglich der aktuellen Herausforderungen und andererseits das entwickelte Referenzmodell des Materialkatasters. Im Besonderen werden dabei die Maßnahmen auf der strategisch-planerischen Ebene ausformuliert, sowie die mögliche Anwendung der Materialkatasters bei deren Umsetzung vorgeschlagen.

Das Kapitel 7 fasst in einem Fazit die Ergebnisse und Schlussfolgerungen der Arbeit zusammen.

1.5. Expert:inneninterviews

Das Ziel der Expert:inneninterviews war es, die Einblicke in die Praxis der kreislauforientierten Planung zu erhalten und die Ansätze und Herausforderungen im Planungsprozess zu identifizieren. Die Expert:inneninterviews sind die Befragungen von Personen, die laut der Definition von Meuser und Nagel, einen Informationsvorsprung gegenüber dem Forschenden, beziehungsweise ein Betriebs- und Kontextwissen im jeweiligen Fachbereich aufweisen (Meuser & Nagel, 1931: S. 445-448). Bei der Auswahl der Interviewpartner:innen soll ein möglichst breites Spektrum der Expert:innen angesprochen werden, um das Thema aus unterschiedlichen Perspektiven zu betrachten (Ullrich, 2006: S. 102). Demnach wurden die Interviews mit Expert:innen aus unterschiedlichen Planungsebenen durchgeführt, um damit die Maßstäbe der kreislauforientierten Planung von der

strategischen und städtebaulichen Planung bis hin zum Gebäudeentwurf und Sanierung zu beleuchten.

Die Expert:inneninterviews fokussierten auf die Aspekte des Tätigkeitsbereiches des/der jeweiligen Experten/Expertin. Die Gesprächsthemen umfassten die Ansätze und Herausforderungen bei Umsetzung der Kreislaufprinzipien in der Planung auf verschiedenen Maßstabsebenen, von der Stadt- bis hin zur Gebäudeplanung, sowie die Bedeutung der Digitalisierung in diesem Kontext. Sie liefern somit Erkenntnisse über den aktuellen Stand der Planungspraxis sowie über das Potenzial der digitalen Tools für die Unterstützung der Planungsprozesse.

Die Interviews wurden mit folgenden Expert:innen durchgeführt (nach Reihenfolge der Interviewtermine):

Pascal Angehrn, Designer FH/VSAL: baubüro in situ ag, Zirkular GmbH

Architekt DI Thomas Matthias Romm: Architekturbüro forschen planen bauen ZT

DIⁱⁿ Verena Macho: FCP Fritsch, Chiari & Partner ZT GmbH / Arbeitsgruppe Kreislaufwirtschaft und Sanierungszyklen bei IG Lebenszyklus Bau

DI Christian Sustr: FCP Fritsch, Chiari & Partner ZT GmbH / Arbeitsgruppe Kreislauffähiges Sanieren bei Digital Findet Stadt

DIⁱⁿ Melanie Edlinger: Wiener Umwelthanwaltschaft, Bereich Stadtplanung und Verkehr

Die Ergebnisse der Interviews bilden die Grundlage für das Kapitel 3.4, das sich auf Ansätze und Herausforderungen der kreislauforientierten Planungspraxis konzentriert, sowie für das Kapitel 6, das Handlungsempfehlungen zur Bewältigung dieser Herausforderungen vorschlägt.

1.6. Kreislaufwirtschaft und Planungsprozesse der Stadtentwicklung

Die Stadtentwicklung ist ein aktiver räumlicher und struktureller Veränderungsprozess, der alle Planungen und Maßnahmen zur städtebaulichen Ordnung und baulichen Entwicklung einer Stadt umfasst (*Umweltbundesamt Deutschland, 2017*). Der Stadtentwicklungsprozess kann in einer idealisierten Form als eine Abfolge der übergeordneten Phasen – von Strategie und Planung, über Bauen und Betrieb, bis hin zur Nachnutzung der Flächen und Gebäuden betrachtet werden (Abbildung 3). Die Prozesskette spannt sich dabei in Tätigkeitsfelder in zunehmend detaillierten Maßstäben – von Raum- Stadt- und Arealplanungsebene bis hin zur Ebene einzelner Gebäude (*Giffinger et al., 2021: S. 14*). Die Tätigkeitsfelder Zwischennutzung, Umbau, Abriss und Urban Mining in der Nachnutzungsphase stellen hierbei das Ende des Lebenszyklus eines Gebäudes dar (*Giffinger et al., 2021: S. 62*) und umfassen die Maßnahmen zum weiteren Umgang mit der Fläche, mit der Gebäudestruktur und mit den verbauten Materialien des Objektes.

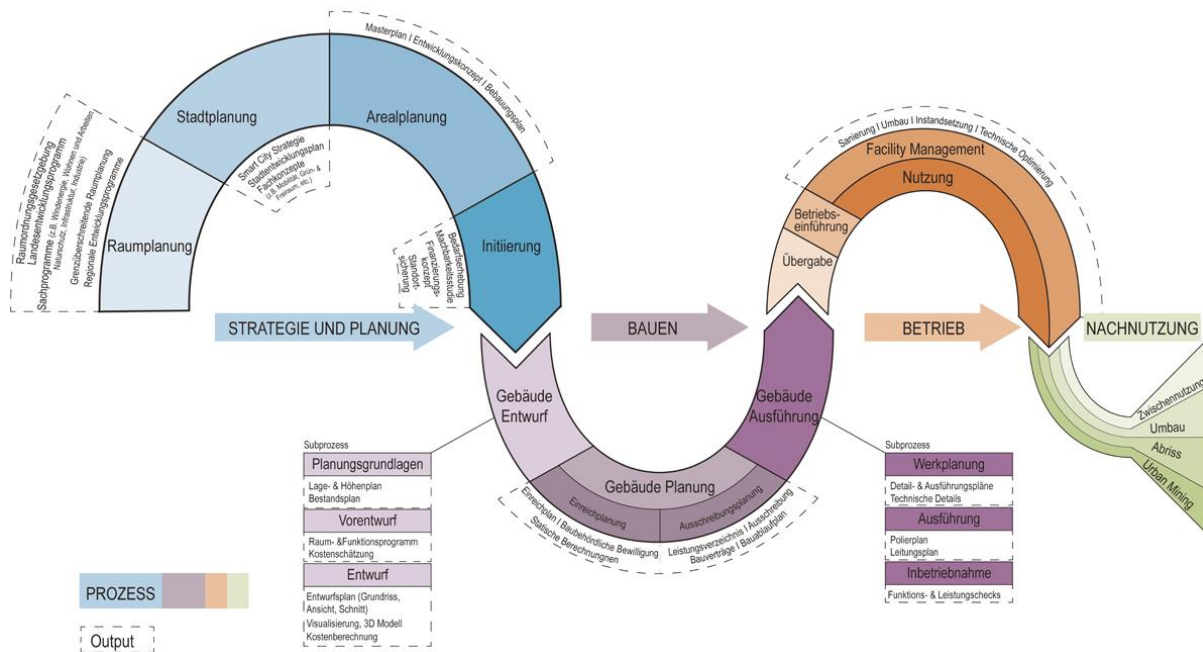


Abbildung 3: Prozesskette - Planen, Bauen und Betreiben. Quelle: BMK, 2018, zitiert in Stadt der Zukunft, 2023

Giffinger et al. (2021) weisen darauf hin, dass der lineare Charakter der Prozesskette die Komplexität der realen Bedingungen der Planung jedoch nicht widerspiegelt. Im Gegensatz dazu wird eine im Kreislauf geschlossene Abbildung des Prozessablaufes vorgeschlagen, die dem tatsächlichen Sachverhalt des Prozessablaufes gerecht werden soll (Giffinger et al., 2021: S. 14, S. 44).

Wie bereits erwähnt, geht mit der Stadtentwicklung der Einsatz und Nutzung verschiedener endlicher Ressourcen einher. In diesem Zusammenhang können der Ressourceneinsatz, die Ressourcennutzung sowie das Recycling der eingesetzten Ressourcen als die Phasen der Stadtentwicklung begleitende immanente Prozesse betrachtet werden (Abbildung 4).

Die Abbildung 4 zeigt die Zuordnung dieser Prozesse zu den Phasen und Tätigkeitsfeldern der Stadtentwicklung. Die gewonnenen Rohstoffe in Form von Baumaterialien werden in den Phasen der Strategie und Planung sowie des Bauens für die Errichtung der Bauwerke und Infrastruktur eingeplant und eingesetzt. In der Phase des Betriebs sowie am Anfang der Nachnutzungsphase werden diese Ressourcen genutzt bis die Objekte das Ende ihres Lebenszyklus erreichen. Die Nachnutzungsphase kann als umfassender Recyclingprozess betrachtet werden, der die Flächen des Objektes sowie die in Baumaterialien und Bauteilen enthaltene Rohstoffe wieder in den Kreislauf der neuen Nutzung einführt. Insofern kann die Nachnutzungsphase als eine Art Vorplanungsphase an der Grenze zwischen dem Ende des alten und dem Anfang des neuen Objektlebenszyklus angesehen werden. Insbesondere darin liegt das Ziel der Kreislaufwirtschaft, die sich im Kontext der ressourcenschonenden Stadtentwicklung als nachhaltige und effiziente

Nutzung und Verwertung der eingesetzten Ressourcen wie Flächen und Rohstoffe interpretieren lässt. Um dieses Nachhaltigkeitsziel zu erreichen, sind bereits in der Vorplanung Entscheidungen zu treffen, denn im Hinblick auf die Steuerungsmöglichkeit sowie auf das Einflusspotenzial zur Erreichung der Projektziele und Abwägung der möglichen Zielkonflikten nehmen insbesondere die frühen Planungsphasen eine hohe Bedeutung ein (*Shadow, 2021: S. 50*).

Vor diesem Hintergrund konzentriert sich die vorliegende Arbeit auf die Phasen Strategie und Planung, sowie an die unmittelbar anschließenden Tätigkeitsfelder der Phase Bauen (Gebäudeentwurf und Gebäudeplanung) und der Phase Nachnutzung (Umbau und Abriss). Damit wird der Fokus auf Ansätze, Tools, Herausforderungen und Rahmenbedingungen gerichtet, die durch ihre Ansiedlung auf den strategisch-planerischen Ebenen der Stadt- und Gebäudeplanung einen besonders bedeutenden Effekt für die Umsetzung der Kreislaufprinzipien in der Stadtentwicklung erzielen können.

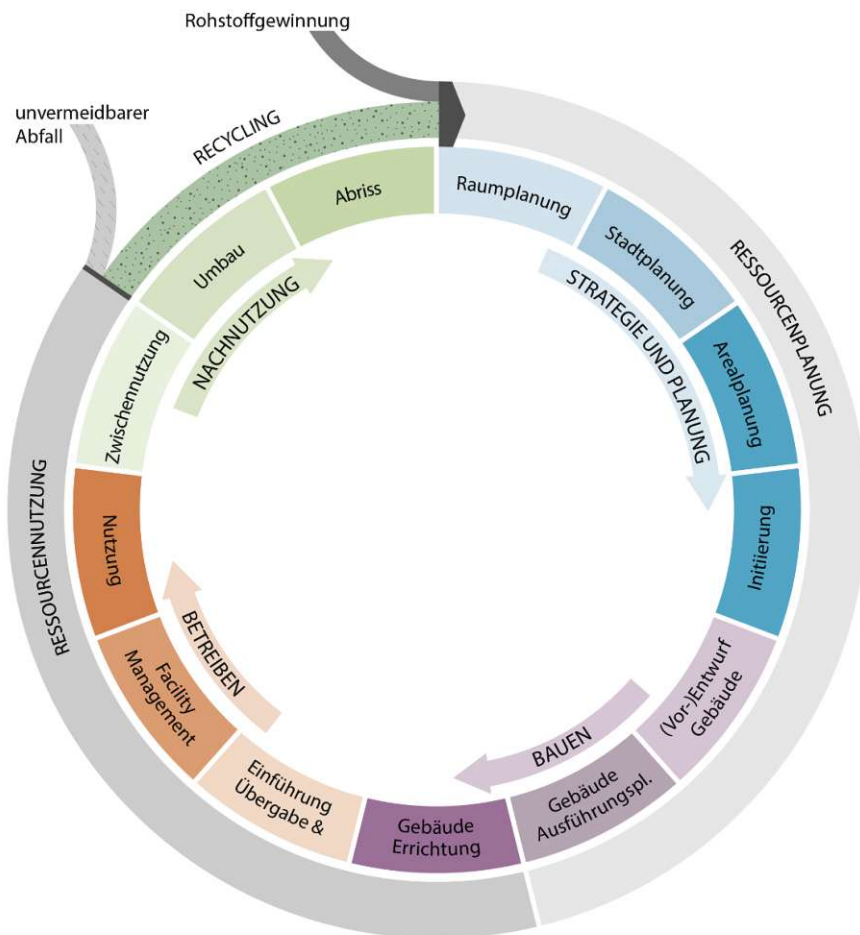


Abbildung 4: Prozesskette Planen-Bauen-Betreiben und Ressourcenkreislauf. Eigene Darstellung anlehnd an Giffinger et al., 2021

1.7. Glossar der Grundbegriffe

Brutto-Grundfläche (BGF)

Die Brutto-Grundfläche eines Bauwerkes ist die Summe aller dessen Ebenenflächen abzüglich der unverwendbare Grundfläche. Zur Ebenenfläche gehören Dachgeschosse und Zwischengeschosse, Kellergeschosse und umschlossene/überbaute Verbindungsgänge. Die unverwendbare Grundfläche besteht aus Öffnungen, Atrien und Hohlräumen (*ÖNORM EN 15221-6:2011 12 01*).

Brutto-Rauminhalt (BRI)

„Der Brutto-Rauminhalt ist der Rauminhalt des Bauwerkes, der von den äußeren Begrenzungsflächen und nach unten von der Unterfläche der konstruktiven Bauwerkssohle umschlossen wird“ (*ÖNORM B 1800: 2013 08 01*).

Graue Energie, Graue Emissionen

Im Kontext des Bauwesens umfasst der Begriff Graue Energie den Energieverbrauch zur Gewinnung, Herstellung und Verarbeitung und Beförderung von Baustoffen, zum gesamten Transportaufwand der Bauwerkserrichtung, im Gebäudebetrieb sowie bei der Entsorgung der Entsorgung und Recycling der nach dem Gebäudeabbruch resultierenden Abfälle. Die CO₂-Emissionen, die in denselben Prozessen des Gebäudelebenszyklus entstehen, werden als Graue Emissionen bezeichnet (*Hillebrandt et al., 2018: S. 217; Weidner et al., 2021: S. 970-975*).

Kreislauffähigkeit, Zirkularität bzw. kreislauffähig, zirkulär

Fähigkeit von Materialien, Bauteilen oder ganzen Gebäuden nach Ende ihres Lebenszyklus wiederverwendet oder als Sekundärrohstoffe verwertet zu werden. Die Kreislauffähigkeit bezieht sich auf verschiedene Betrachtungsebenen. Auf der räumlichen Ebene wird damit die Flexibilität zur Weiternutzung des Bauwerkes bezeichnet. Auf der konstruktiven und materiellen Ebene umfasst der Begriff die Wiederverwendbarkeit ganzer Bauteile und die Recyclebarkeit der verbauten Materialien, wobei Faktoren wie zerstörungsfreie Demontierbarkeit, die Trennbarkeit der Materialverbunde, das Auftreten von Stör- und Schadstoffen, der Rückbauaufwand etc. berücksichtigt werden. Der Begriff Kreislauffähigkeit bezeichnet daher ein Potenzial zur Wiederverwendung und Verwertung von Bauwerken oder deren Bestandteilen, das durch diverse Indikatoren bewertet werden kann (*Rosen, 2021: S. 156-159*).

Kreislauffähig, Kreislauffähig

Eigenschaften von Prozessen, Produkten und Methoden, die nach den Grundsätzen und Prinzipien der Kreislaufwirtschaft ausgerichtet und gestaltet sind.

Materiallager, Rohstofflager, Ressourcenlager, anthropogene Lagerstätte

Die Gesamtmenge der aus natürlichen Lagerstätten entnommenen und in Infrastrukturen, Gebäude und Güter umgewandelten Rohstoffe und Materialien, die zukünftig als Sekundärrohstoffe wiederverwendet werden können. Da diese Lager durch menschliche Aktivitäten entstehen, werden sie auch als anthropogene Lagerstätten bezeichnet. Die Begriffe werden synonym verwendet und umfassen die genutzten und ungenutzten Lager sowie Ablagerungen verschiedener Abfälle. Die genutzten Lager bestehen aus Gütern, die sich aktuell in der Verwendung befinden, wie Fahrzeuge, Geräte oder bewohnbare Gebäude. Zu ungenutzten Lager gehören die nicht-entsorgten Güter ohne weiteren Nutzungsabsicht, wie stillgelegte Bahntrassen, Industriebrachen oder abbruchreife Gebäude. Als Ablagerungen werden verschiedene Arten von Deponien, Bergbauhalden und sonstige industrielle Abfälle bezeichnet (*Umweltbundesamt (Deutschland), o.J.; Brunner & Kral, 2013; Müller et al., 2017*).

Materialintensität

Menge eines bestimmten Baumaterials (z.B. Beton, Ziegel, Stahl, Bauholz, Glas, Mineralwolle, Gips etc.) pro Volumeneinheit des Brutto-Rauminhalts (m³ BRI) eines Gebäudes, ausgedrückt in Tonnen (t) oder Kilogramm (kg) pro Kubikmeter (m³). Sie wird berechnet, indem das Gesamtvolumen oder die Gesamtfläche eines Materials mit seiner volumetrischen oder flächenbezogenen Dichte multipliziert und durch den Brutto-Rauminhalt des Gebäudes dividiert wird (*Lederer et al., 2021: S. 853-854*).

Primärrohstoffe, Primärmaterialien

Unbearbeitete natürliche Ressourcen, die der Natur entnommen, aufbereitet und in der Produktion eingesetzt werden. Dazu zählen Kies, Sand, Kalkstein, Holz, Erze etc. Darüber hinaus bezeichnet das Präfix „Primär“ die Produkte, die ausschließlich aus Primärrohstoffen bzw. Primärmaterialien hergestellt werden – beispielsweise Primärbeton im Gegensatz zum Sekundär- oder Recyclingbeton (*Müller et al. 2017; Mettke et al., 2015*).

Sekundärrohstoffe, Sekundärmaterialien

Materialien, die durch Recycling aus Abfällen, Altprodukten oder Reststoffen wiedergewonnen werden und für die Herstellung neuer Produkte eingesetzt werden können. Die Begriffe Sekundärrohstoffe und Sekundärmaterialien sind Überbegriffe für alle Arten der wiedergewonnenen Materialien (Metalle, Baustoffe, Glas, etc.) und werden in der deutschsprachigen Literatur und in den Publikationen synonym verwendet (*Enargus, o.J.; Umweltdatenbank, o.J.; Schiller et al., 2022; Luger & Rauh, 2020; Müller et al., 2017*).

Sekundärbaustoffe, Recycling-Baustoffe

Spezifische Sekundärmaterialien, die aus Bauabfällen wie Bauschutt, Aushub oder Straßenaufbruch aufbereitet werden und für die Betonherstellung oder als Verfüllung im Erd-, Tief- und Straßenbau verwendet werden. Die Recycling-Baustoff Verordnung 2016 definiert den Begriff Recycling-Baustoffe als „eine aus Abfällen hergestellte natürliche, industriell hergestellte oder recycelte Gesteinskörnung, die gemäß der EU-Bauprodukte-Verordnung als Baustoff verwendet werden kann“ (BVSE, 2024; RBV 2016).

Schadstoff

„Stoff, der entweder selbst oder im Zusammenwirken mit anderen Stoffen oder durch seine Abbauprodukte oder Emissionen Mensch oder Umwelt schädigen oder beeinträchtigen oder zu einer Wertminderung bzw. Nutzungseinschränkung von Bauwerken führen kann“ (ÖNORM B 3151:2022 01 01).

Störstoff

„Material, das die vorgesehene Behandlung oder einen Behandlungsschritt verhindert oder erschwert“ (ÖNORM B 3151:2022 01 01).

2. URBANE STOFFSTRÖME

2.1. Urbaner Metabolismus

Die Bedeutung von großen Städten in der modernen Welt geht weit über ihre physischen Grenzen hinaus. Sie sind keine autark funktionierenden Systeme, sondern vielmehr Netzknotenpunkte im globalen Stoffstromsystem, die gleichermaßen am Import der großen Ressourcenmengen und an die Entsorgung verschiedenster Abfallströme angewiesen sind. Obwohl die städtischen Siedlungen lediglich 2-3% der Landfläche der Erde beanspruchen, tragen sie mit drei Viertel zum weltweiten Ressourcenverbrauch sowie mit 80% zu globalen Treibhausgasemissionen bei (Bott & Siedentop, 2018: S. 33).

Die Entwicklung und das Funktionieren einer Stadt stehen in einem Zusammenhang mit ihrer internen Dynamik und sowie dem Gütertausch, der sich weit über die unmittelbare Umgebung hinaus bis in die globale Dimension erstreckt. Direkte und indirekte Materialbewegungen, auch als Stoffströme oder Stoffflüsse bezeichnet, durchziehen die urbanen Gebiete auf äußerst komplexe Weise. Die Stoffströme entstehen durch Import, Export sowie Verbrauch, Verwertung und Weiterverarbeitung von Stoffen und Gütern (Abbildung 5). Ähnlich dem Stoffwechsel eines Ökosystems tauschen Städte Energie und Material, sowohl Nähr- als auch Abfallstoffe, mit ihrer Umgebung aus (Böttge et al. 2018a: S. 106; Böttge et al. 2018b: S. 108; WBGU, 2016: S. 71).

Diese Sichtweise, bekannt als urbaner Metabolismus (Wollman, 1965: S. 179-180), betrachtet die Stoff- und Energiebewegungen einer Stadt und stellt ein Rahmenwerk zur Analyse der Ressourcen-, Abfall und Emissionsflüsse zwischen der Stadt und Umwelt dar.

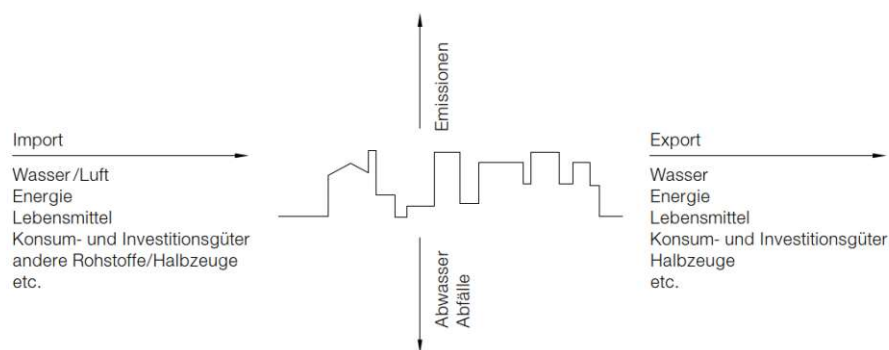


Abbildung 5: Exemplarische Stoffströme in der Stadt. Quelle: Böttge et al., 2018a

In Bezug auf ihre Stoffflüsse weichen die Städte von natürlichen Ökosystemen jedoch ab: Während natürliche Ökosysteme primär zyklische oder geschlossene Materialflüsse aufweisen, folgen städtische Systeme einem linearen Metabolismus. Diese lineare Natur von urbanen Materialflüssen stellt eine besondere Herausforderung bei der Integration der Städte in das natürliche Ökosystem dar. Daher ist es für eine nachhaltige Ressourcennutzung essenziell, dass Städte ein zirkuläres

Modell des Metabolismus annehmen, bei dem Abfälle recycelt und als Materialien wiederverwendet werden können (WGBU, 2016: S. 71).

Für die ressourcenschonende Stadtentwicklung ist es somit von entscheidender Bedeutung die Energie- und Materialflüsse zu verstehen, um den anthropogenen Materialumsatz durch das gezielte Stoffstrommanagement optimieren zu können. Der methodische Ansatz des Stoffstrommanagements besteht darin, die Güter-, Stoff-, Flächen- und Energiehaushalte, bzw. deren Verbrauch in Bezug auf die Materialien, Betriebe oder Regionen zu erfassen, zu bewerten und zu steuern (Escalante & Hafner, 2017: S. 689-691).

Wie in der Abbildung 6 dargestellt, erfolgt die Bewirtschaftung der Stoffströme durch ihre Lenkung zwischen den Quellen und den Senken, wobei die Stoffströme über verschiedenen Verwertungswegen zwischen den Wirtschaftssektoren geführt werden.

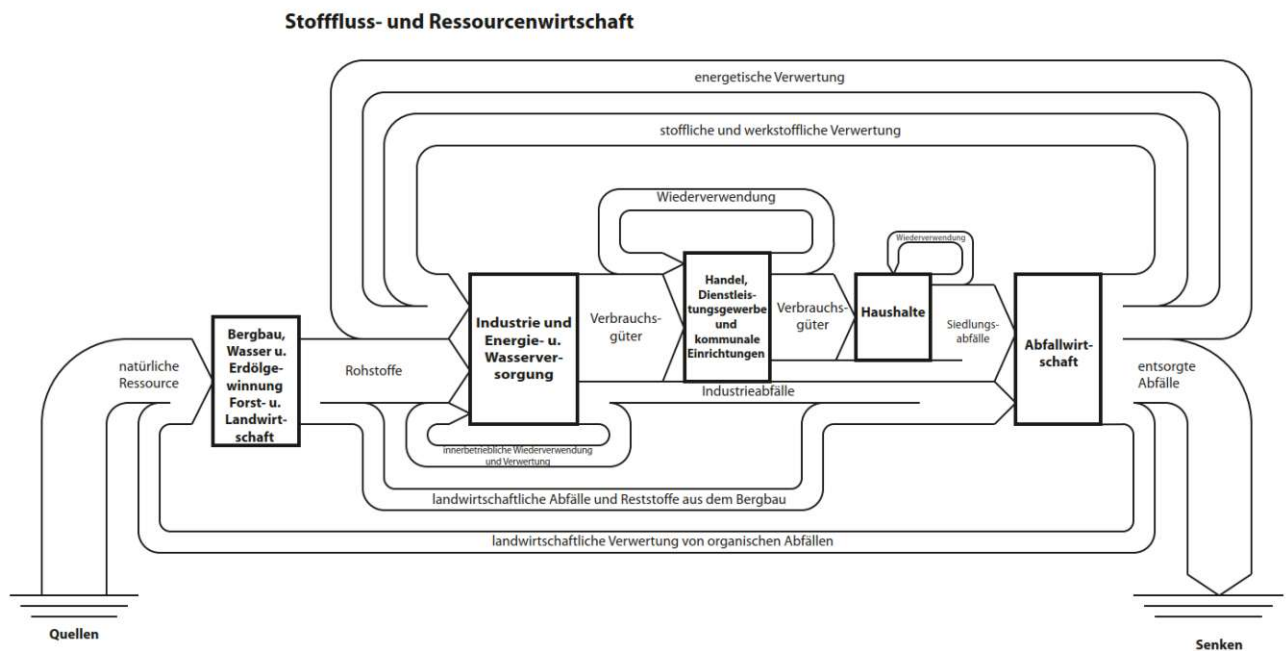


Abbildung 6: Stoffstrommanagement und Abfallwirtschaft. Quelle: Escalante & Hafner, 2017: S. 691

Die Stoffströme lassen sich dabei in langfristige und kurzfristige Ströme unterteilen. Langfristige Ströme umfassen beispielsweise Baustoffe, die erst am Ende ihrer in Regel jahrzehntelangen Gebäudenutzung als Abbruchabfälle wieder in den Stoffstrom gelangen, wobei sie durch Recycling oder Wiederverwendung wieder verfügbar sein können. Kurzfristige Ströme, wie die Versorgung mit Lebensmitteln und Energie oder die Entsorgung von Siedlungsabfällen, zirkulieren hingegen in deutlich kürzeren Intervallen. Weiters wird zwischen den Stoffströmen, die langfristige Rohstofflager bilden oder aus deren Mobilisierung resultieren, und solchen, die nur kurzfristige

Lager bilden und somit sich im kontinuierlichen Stoffstrom befinden, unterschieden (Böttge et al. 2018a: S. 108-109). Die Abbildung 7 veranschaulicht diese Gliederung.

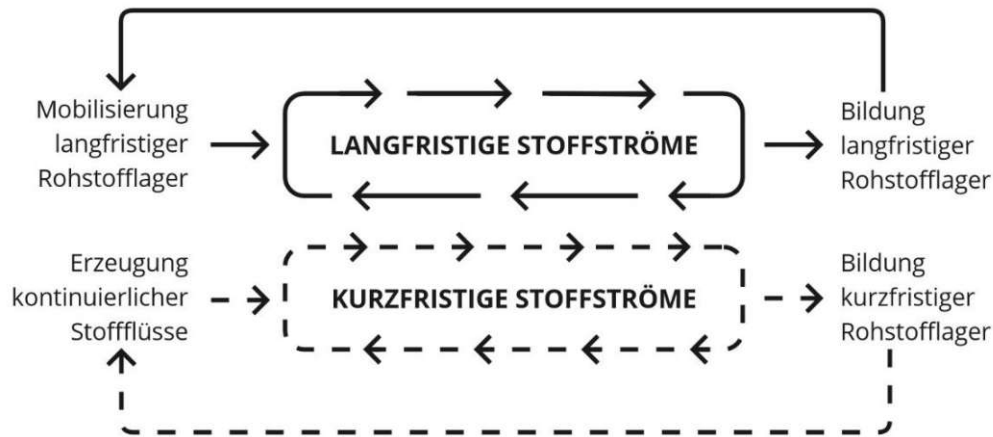


Abbildung 7: Zeitliche Aspekte der Stoffströme. Eigene Darstellung anlehnd an Böttge et al., 2018a

Demnach können Stoffströme unterschiedlichen Zeit- und Planungshorizonten im Rahmen des Stoffstrommanagements zugeordnet werden. Dabei steht insbesondere der langfristige Verbleib von Materialien im Stoffstrom im Fokus, wobei die Kreislaufführung der Ressourcen ihre Verfügbarkeit für die Zukunft sicherstellen kann (Böttge et al. 2018a: S. 108-109).

In diesem Kontext rückt die mit der Stadtentwicklung einhergehende Bautätigkeit in den Fokus des Stoffstrommanagements. Der stetige Wandel und die Entwicklung des städtischen Gebäudebestandes erzeugen erheblichen Energieverbrauch, Materialflüsse und Treibhausgasemissionen: Sowohl durch den Einsatz von Baumaterialien als auch durch die Entstehung von Bau- und Abbruchabfällen.

Darüber hinaus stellen die umfassenden Mengen sowie die Stoffvielfalt der im Gebäudebestand verbauten Materialien einen bedeutenden langfristigen Ressourcenlager dar, wobei die Wertstoffe nach ihrer Freisetzung durch Abriss oder Umbau am Ende des Gebäudelebenszyklus wieder zur Verfügung stehen können (Böttge et al. 2018a: S. 108). Die Komplexität dieses Ressourcenlagers erfordert somit ein entsprechend komplexes Stoffstrommanagement sowie kreislauforientierte Planungsansätze, um kreislaufgerechte, umweltverträgliche und wirtschaftliche Nutzung dieser Ressourcen zu ermöglichen. Brunner und Kral (2013) sehen dabei eine Zukunftsaufgabe der Städte, die Kreislaufführung der Wertstoffe und Schadstoffbeseitigung nicht nur als „reine Recycling- und Entsorgungsaufgabe zu erkennen, sondern als gestalterischen und planerischen Prozess“, um dadurch „langfristig einen erheblichen wirtschaftlichen und ökologischen Vorteil“ zu erzielen.

2.2. Materialflüsse und CO₂-Emissionen in Wien

Die gesellschaftlichen Materialflüsse eines Landes, einer Region oder einer Stadt werden anhand der Methode der Materialflussrechnung ermittelt. Die Materialflussrechnung erfasst die Mengen an Rohstoffentnahmen aus der Natur zwecks gesellschaftlicher Produktion und Konsum (Inputs), und die aus der gesellschaftlichen Verwendung dieser Ressourcen resultierende Abfälle und Emissionen (Outputs) (*Eisenmenger et al., 2022: S.14*).

Die Ermittlung erfolgt anhand folgender Indikatoren, die sowohl in Bezug auf ein Land als auch auf eine Stadt berechnet werden können:

Inlandsmaterialentnahme (DE, domestic extraction)

Mengen an Rohstoffe, die aus der Natur auf den Landflächen eines Landes oder einer Stadt (innenstädtische Materialentnahme) entnommen wurden (*Eisenmenger et al., 2022: S.15*).

Produktionsbasierter Inlandsmaterialverbrauch (DMC, domestic material consumption)

Mengen an Materialien, die für die gesellschaftliche Produktion oder Konsum verbraucht wurden. Der Indikator setzt sich aus der inländischen bzw. innenstädtischen Materialentnahme (DE) zuzüglich der direkten Importe und abzüglich der direkten Exporte zusammen (*ebd.*).

Konsumbasierter Material-Fußabdruck (MF, material footprint)

Mengen an weltweit gewonnenen Materialien, die innerhalb internationaler Produktionsketten verbraucht wurden, um den Endverbrauch eines bestimmten Landes oder einer Stadt zu decken. Der Indikator wird als inländische bzw. innenstädtische Materialentnahme (DE) zuzüglich der indirekten Importe und abzüglich der indirekten Exporte berechnet. Der Vorteil des Indikators besteht darin, dass damit die gesamte Rohmaterialentnahme der Endverwendung zugeordnet werden kann (*ebd.*).

Für die Materialflussrechnung werden vier Hauptmaterialkategorien unterschieden: Biomasse, Metalle, Nicht-metallische Mineralstoffe und fossile Energieträger (*Eisenmenger et al., 2020: S. 15*). Für die Bewertung des Bausektors sind insbesondere Werte der nicht-metallischen Mineralstoffen und Metalle maßgeblich. Die Kategorie der nicht-metallischen Mineralstoffen umfasst Stoffe wie Sand, Kies, Schotter, Kalkstein und Ton (*Eisenmenger et al., 2020: S. 15, S. 114*), die überwiegend im Bau und Erhalt der Gebäude und Infrastruktur bzw. für die Herstellung der Baustoffe wie beispielsweise Beton oder Mauersteine eingesetzt werden. Die Kategorie der Metalle umfasst Eisen, Nicht-Eisenmetalle und Metallerzeugnisse, die unter anderem im Hoch- und Infrastrukturbau als Stahl, Blei, Kupfer, Nickel, Zinn, Zink und Aluminium für Rohbau, Technik und Ausbau verwendet werden (*Eisenmenger et al., 2020: S. 114; Zilch et al. 2014: S. 1016-1029*).

Bei der Berechnung der Treibhausgasemissionen wird wie beim Materialverbrauch zwischen produktionsbasierten Emissionen (ähnlich dem DMC) und den konsumbasierten Treibhausgasemissions-Fußabdrücken (ähnlich dem MF) unterschieden. Der Indikator der Inlandsmaterialentnahme (DE) wird dabei nicht verwendet, da die CO₂-Emissionen keine aus der Natur zu entnehmende oder direkt zu handelnde Rohstoffe, sondern den Gütern und Dienstleistungen indirekt vorgelagerte Flüsse darstellen (Eisenmenger et al., 2022: S. 42).

Im Rahmen des Forschungsprojektes „MOCAM – Monitoring der CO₂-Emissionen und des Materialfußabdrucks Wiens“¹ wurden in Jahren 2021-2022 eine Materialfluss- und CO₂-Emissionsrechnung für Wien anhand der Daten aus den Jahren 2010 und 2019 vorgenommen. Analysiert wurden dabei unter anderem die sogenannten sektoralen Hotspots: Die Wirtschaftssektoren oder gesellschaftlichen Aktivitäten mit einem besonders hohen Materialverbrauch und CO₂-Emissionen darstellen (Eisenmenger et al., 2022: S. 4).

Die Ergebnisse der durchgeführten Materialflussrechnung (Abbildung 8) zeigen, dass im Jahr 2019 der Bausektor für den größten produktionsbasierten Materialverbrauch unter den sektoralen Hotspots in der Höhe von 3,1 Mio. Tonnen/Jahr verantwortlich ist, wobei 1,9 Mio. Tonnen/Jahr dem Neubau und Sanierung von Gebäuden und 1,2 Mio. Tonnen/Jahr den Infrastrukturbauten zuzurechnen sind. Im Vergleich zum Jahr 2010 verzeichnet dabei der Gebäudebau einen Anstieg von 37%, der Infrastrukturbau jedoch eine Reduktion um 8%.

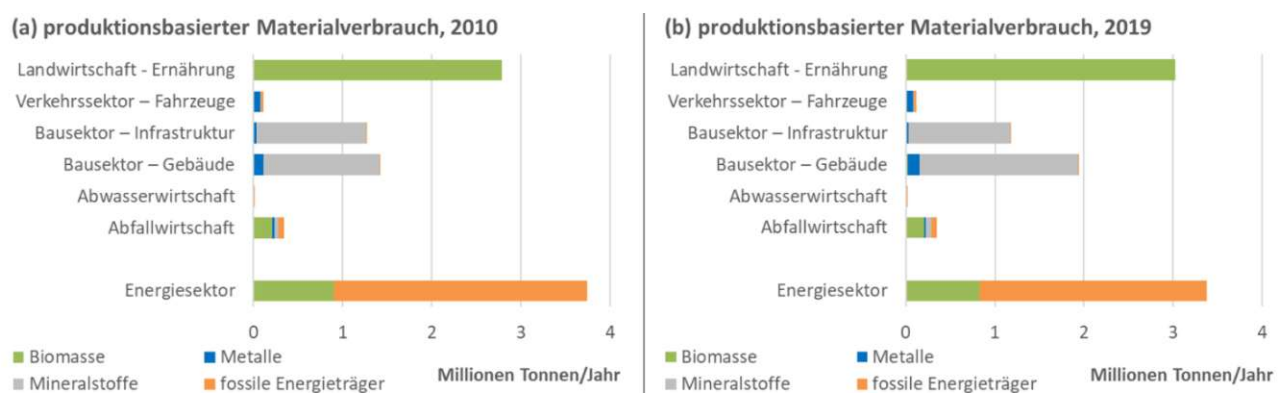


Abbildung 8: Produktionsbasierter Materialverbrauch 2010 und 2019. Quelle: Eisenmenger et al. 2022: S. 55

Auch in Bezug auf den konsumbasierten Materialfußabdruck weist der Bausektor im Jahr 2019 einen der höchsten Werte unter den sektoralen Hotspots mit insgesamt 6,1 Mio. Tonnen/Jahr auf,

¹ „MOCAM – Monitoring der CO₂-Emissionen und des Materialfußabdrucks Wiens“, beauftragt durch die Stadt Wien Abteilung Wirtschaft, Arbeit und Statistik, Laufzeit 2021-2022 (Eisenmenger et al. 2022)

wobei 4,4 Mio. Tonnen/Jahr durch Gebäude- und 1,6 Mio. Tonnen/Jahr durch Infrastrukturbau zuzuschreiben sind (Abbildung 9). Der Anstieg vom Jahr 2010 beträgt dabei 15%, die Großteils aus dem Gebäudebau stammen.

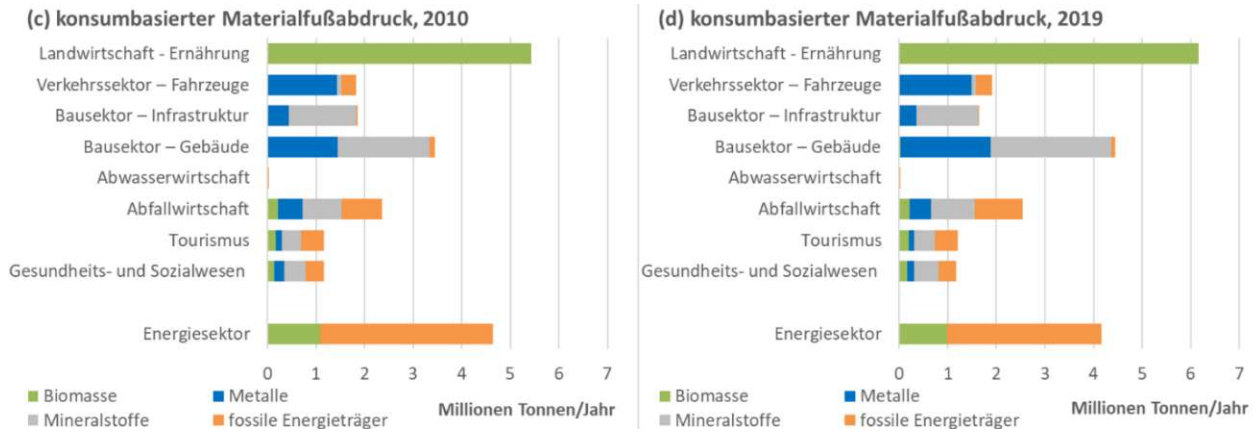


Abbildung 9: konsumbasierter Materialfußabdruck für Jahre 2010 und 2019. Quelle: Eisenmenger et al., 2022: S. 55

Im Hinblick auf die produktionsbasierten CO₂-Emissionen gehört der Bausektor (17% oder ca. 1,5 Mio. Tonnen/Jahr) neben Verkehr (39% oder ca. 3,5 Mio. Tonnen/Jahr) und Energieerzeugung (29% ca. 2,5 Mio. Tonnen/Jahr) zu drei sektoralen Hotspots, die im Jahr 2019 insgesamt 85% der gesamten CO₂-Emissionen oder 7,5 Mio. Tonnen/Jahr in Wien verursachen (Abbildung 10). Die Entwicklung der CO₂-Werte aller Sektoren blieb von 2010 bis 2019 relativ konstant, außer eines Wachstumstrends im Energiesektor ab Jahr 2014, wie die Grafik in der Abbildung 10 zeigt.

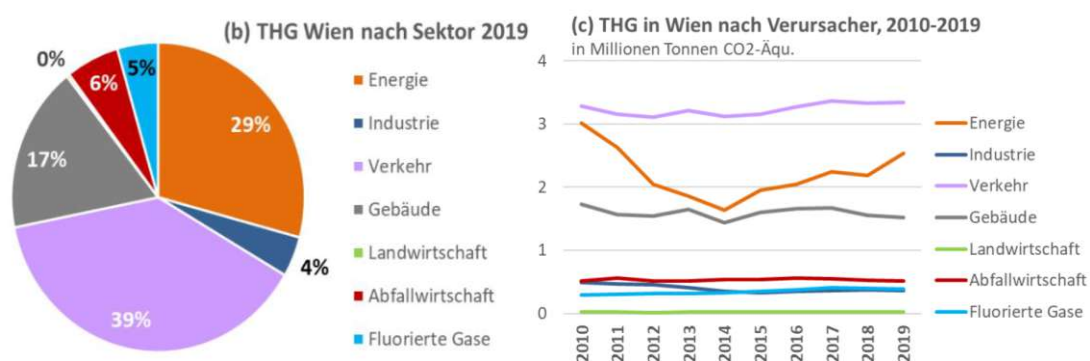


Abbildung 10: CO₂-Emissionen in Wien in Jahren 2010 bis 2019. Quelle: Eisenmenger et al., 2022: S. 44

Ebenso in Bezug auf CO₂-Fußabdruck (Abbildung 11) nimmt Wiener Bausektor mit 0,7 Mio. Tonnen CO₂-Äqu/Jahr² den dritten Platz neben den Hauptverursachern Tourismus und Gesundheits- und

² Die Gruppe der Treibhausgasemissionen setzt sich aus Kohlenstoffdioxid (CO₂), Methan (CH₄), Lachgas (N₂O) und fluoridierte Gase (F-Gase) zusammen und wird üblicherweise in der durch Treibhausgaspotenzial-

Sozialwesen mit 1,2 Mio. Tonnen bzw. 0,9 Mio. Tonnen CO₂-Äqu./Jahr. Darüber hinaus zeigte der Gebäudebau-Anteil des Bausektors die höchste Wachstumsrate von +28% in den Jahren 2010 bis 2019. Die Reduktion des Infrastrukturbau-Anteils von -12% verringerte die Gesamtwachstumsrate, die jedoch mit insgesamt +15% immer noch den zweitgrößten Wert unter den sektoralen Hotspots darstellt.

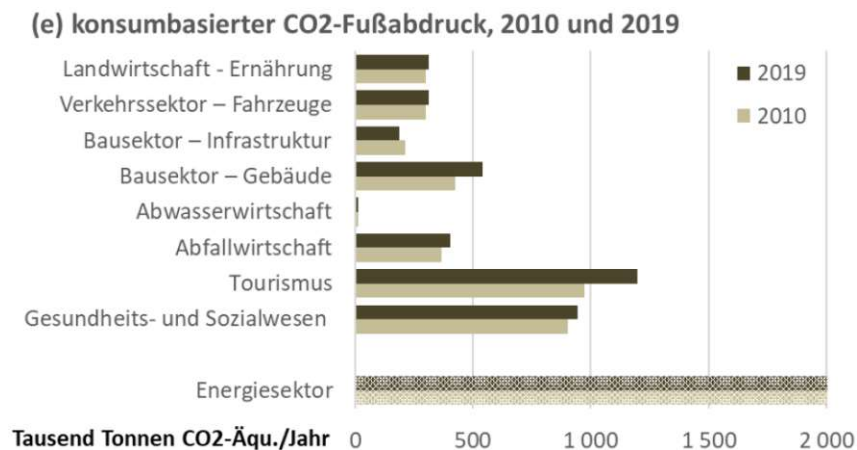


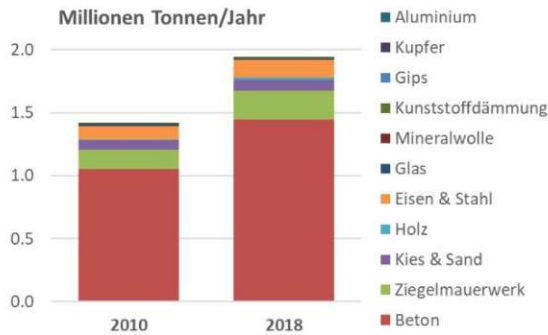
Abbildung 11: Konsumbasierter CO₂-Fußabdruck nach sektoralen Hotspots in Wien in Jahren 2010 bis 2019. Quelle: Eisenmenger et al. 2022: S. 55

Die materialbezogene Analyse der oben betrachteten Indikatoren des Bausektors zeigt, welche Baustoffe maßgeblich die Indikatorenwerte beeinflussen (Abbildung 12). In den Grafiken wird ersichtlich, dass insbesondere Beton, Eisen und Stahl im Gebäudebau sowie Sand und Kies im Infrastrukturbau die Treiber der Indikatorenwerte und somit die hauptsächlichen Faktoren des Materialverbrauchs und der CO₂-Emissionen des Bausektors darstellen. Der Umgang mit diesen Baustoffen insbesondere mit dessen Strömen lässt sich somit als einen wichtigen Ansatzpunkt in ressourcen- und umweltschonenden Planungsstrategien der Stadtentwicklung, sowie als ein Blickwinkel bei der Bewertung der ökologischen Effizienz von Bauvorhaben betrachten.

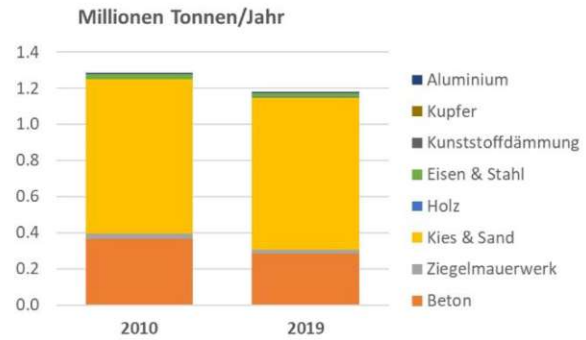
Umrechnung ermittelten Einheit Tonnen CO₂-Äquivalente (Tonnen CO₂-Äqu) ausgedruckt (Eisenmenger et al. 2022)

Produktionsbasierter Materialverbrauch

Bausektor - Gebäude

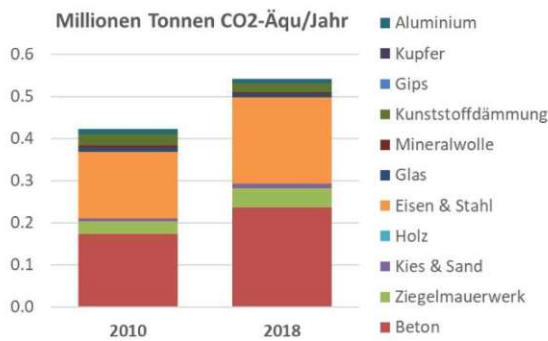


Bausektor - Infrastruktur

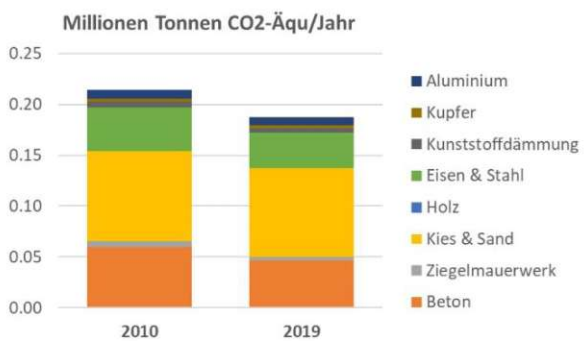


Konsumbasierter CO₂-Fußabdruck

Bausektor - Gebäude

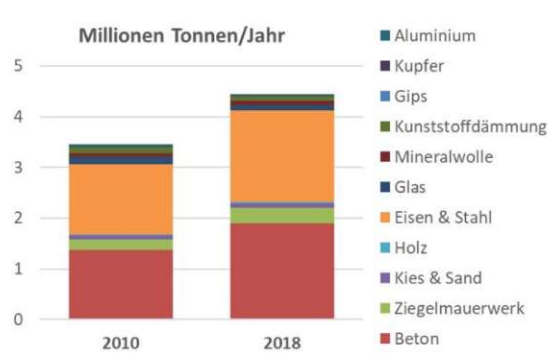


Bausektor - Infrastruktur



Konsumbasierter Materialfußabdruck

Bausektor - Gebäude



Bausektor - Infrastruktur

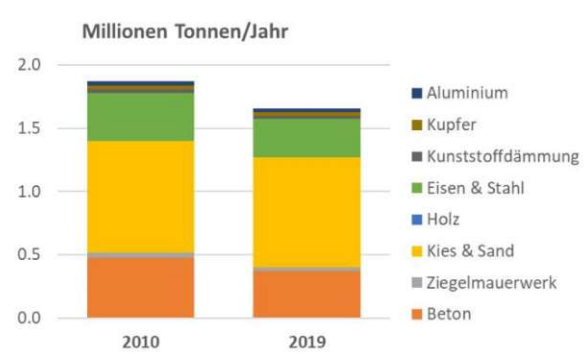


Abbildung 12: Indikatoren des Bausektors nach Materialkategorien. Quelle: Eisenmenger et al. 2022: S. 67-72

Insgesamt liefern die Materialflussrechnungen eine klare Erkenntnis: Der Bausektor hat eine erhebliche und über die Jahre steigende Auswirkung auf den Materialverbrauch und CO₂-Emissionen in Wien. Es lässt sich somit sowohl ein Handlungsbedarf als auch Potenzial des Bausektors im Hinblick auf die umweltgerechte Stadtentwicklung in Wien erkennen. Darüber hinaus legen die Aussagen dieser Daten die Notwendigkeit der Planungsstrategien nahe, die die Stoffstrom- und Baumaterialperspektive als wichtigen Faktoren in die planerische Entscheidungsfindung einbeziehen und in der Maßnahmenentwicklung berücksichtigen.

2.3. Bau- und Abbruchabfallaufkommen in Österreich

Die Abfälle des Bausektors sind ein weiterer Output urbaner Stoffströme, die von der Stadtentwicklung verursacht werden. Dabei handelt es sich im Wesentlichen um Bau- und Abbruchabfälle, sowie um Aushubmaterialien. „Bau- und Abbruchabfälle sind Materialien, die bei Bau- und Abbruchtätigkeiten im Hochbau oder Tiefbau (insb. Straßen- und Schienenbau) sowie bei Sanierungs- und Instandhaltungsmaßnahmen anfallen. Im Hochbau fallen vorwiegend Beton-, Ziegel- und sonstige Mauerwerksabbrüche sowie – insbesondere bei Neubauten – Aushubmaterial an. Weitere Abfälle umfassen – in untergeordneten Mengen – Holz, Metalle, Kunststoffe, gemischte Siedlungsabfälle sowie gefährliche Abfälle. Im Tiefbau fallen vorwiegend Asphalt- und Betonabbruch, Aushubmaterial (insb. technisches Schüttmaterial und Gleisausmaterial), aber auch z. B. Verschnitte von Schalholz, Bewehrungseisen etc. an“ (Neubauer et al., 2023, S. 215).

Wie aus dem Diagramm in der Abbildung 13 ersichtlich, bilden die Abfälle aus der Bautätigkeit die anteils- und mengenmäßig größten Stoffströme des Gesamtabfallaufkommens in Österreich. Insbesondere betragen Bau- und Abbruchabfälle 16% (12,5 Mio. Tonnen) und Aushubmaterialien 60% (46,1 Mio. Tonnen) bzw. insgesamt 76% (58,6 Mio. Tonnen) des Gesamtabfallaufkommens. Darüber hinaus umfasst auch die Kategorie „Übrige Abfälle“ weitere für den Bausektor relevante Abfälle wie Metalle (14.892 Tonnen), Holz (621.500 Tonnen), künstliche Mineralfasern (3.550 Tonnen) und Asbest (105.100 Tonnen). Von 2015 bis 2021 ist das Aufkommen der zwei größten Abfallkategorien aus der Bautätigkeit um 25% bei Bau- und Abbruchabfälle bzw. um 41% bei Aushubmaterialien gestiegen (Neubauer et al., 2023, S. 19).

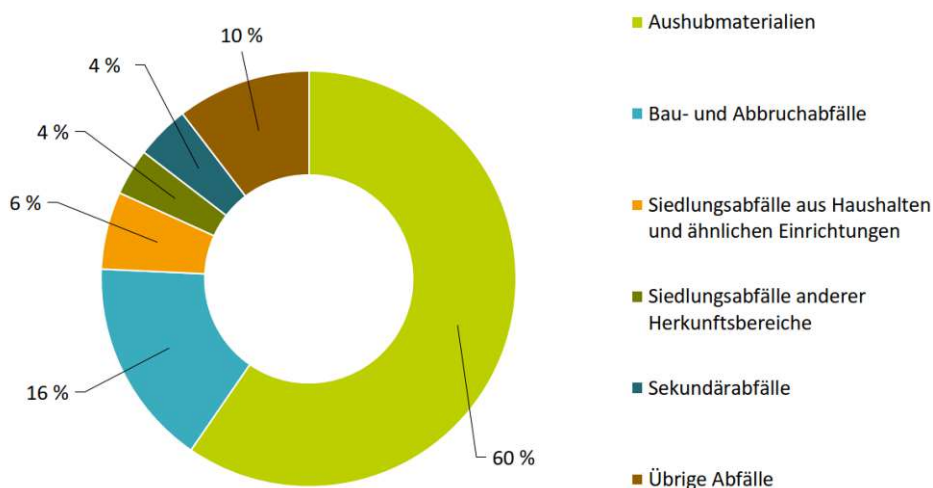


Abbildung 13: Zusammensetzung des Gesamtabfallaufkommens im Jahr 2021 nach Abfallgruppen, in %. Quelle: Umweltbundesamt, 2022, zitiert in Neubauer et al. 2023: S. 19

Ein Vergleich der Entwicklungen des Abfallaufkommens der Bau- und Abbruchabfälle und der Bauwirtschaft in Österreich zwischen 2015 und 2021 lässt eine Abhängigkeit der Abfallmengen von der Baukonjunktur feststellen (Abbildung 15). Zudem hat laut Branchenforschung der Bank Austria der Faktor Materialknappheit als Produktionshindernis in der Baubranche seit 2020 signifikant zugenommen, woraus sich auf eine wachsende Herausforderung bezüglich der Verfügbarkeit von Baustoffen schließen lässt (Abbildung 16). Vor dem Hintergrund dieser Trends rückt die Bedeutung des Gebäudebestandes als Ressourcenlagers, insbesondere als einer zusätzlichen Rohstoffquelle für die Herstellung der Baumaterialien in den Fokus. Beispielsweise, wie die Studie von Lederer et al. (2020) aufzeigt, beträgt das Betonrecycling ein hohes, aber ungenutztes Potenzial zur Deckung des eigenen, überwiegend vom Beton geprägten, Materialbedarfes der Bauindustrie in Wien (Lederer et al., 2020: S. 9). Daraus lässt sich schließen, dass eine effiziente Rückgewinnung, Recycling bzw. Kreislaufführung der im Gebäudebestand enthaltenen Materialien nicht nur zur Schonung der Primärrohstoffe, sondern auch zur Verringerung der Materialknappheit in der Bauwirtschaft beitragen und somit sowohl ökologische als auch wirtschaftliche Vorteile bringen kann.

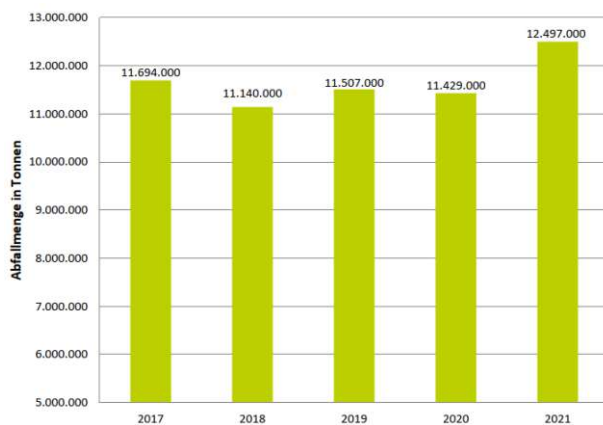


Abbildung 14: Entwicklung des Aufkommens von Bau- und Abbruchabfällen 2017–2021. Quelle: Neubauer et al. 2023 / Umweltbundesamt

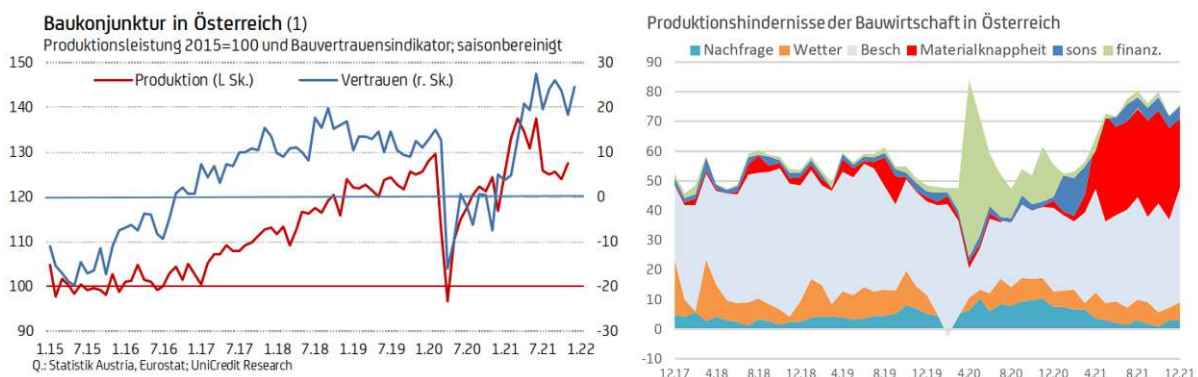


Abbildung 15 (links): Baukonjunktur in Österreich von 2015 bis 2022. Quelle: Wolf, 2022 / Statistik Austria, Eurostat, UniCredit Research

Abbildung 16 (rechts): Produktionshindernisse der Bauwirtschaft in Österreich von 2017 bis 2021. Quelle: Wolf, 2022 / Eurostat, UniCredit Research

2.4. Bauabfallbehandlung in Österreich und Aspekte des Baustoffrecycling

Insgesamt verfügt Österreich über eine breit ausgebaute Infrastruktur mit 941 (165 stationäre und 776 mobile) Behandlungsanlagen für mineralische Bau- und Abbruchabfälle (Neubauer et al., 2023, S. 32).

Wie aus dem Stoffstrombild (Abbildung 17) ersichtlich, wurden dabei aus dem im Jahr 2021 entstandenen 12,5 Mio. Tonnen Abfallaufkommen rund 9,0 Mio. Tonnen Recycling-Baustoffe hergestellt und 497.000 Tonnen in Zementwerken bzw. in Beton- und in Asphaltmischanlagen stofflich verwertet. 2.000 Tonnen der Abbruchabfälle wurden thermisch verwertet und 1.091.000 Tonnen deponiert. Ein Anteil von 47.000 Tonnen wurde exportiert, wovon 38.000 Tonnen stofflich verwertet, 4.000 Tonnen thermisch verwertet und 5.000 Tonnen deponiert wurde. Aus diesen Daten geht hervor, dass der überwiegende Anteil der Bau- und Abbruchabfälle den Recyclinganlagen zugeführt und als Recycling-Baustoffe wiederverwertet wird.

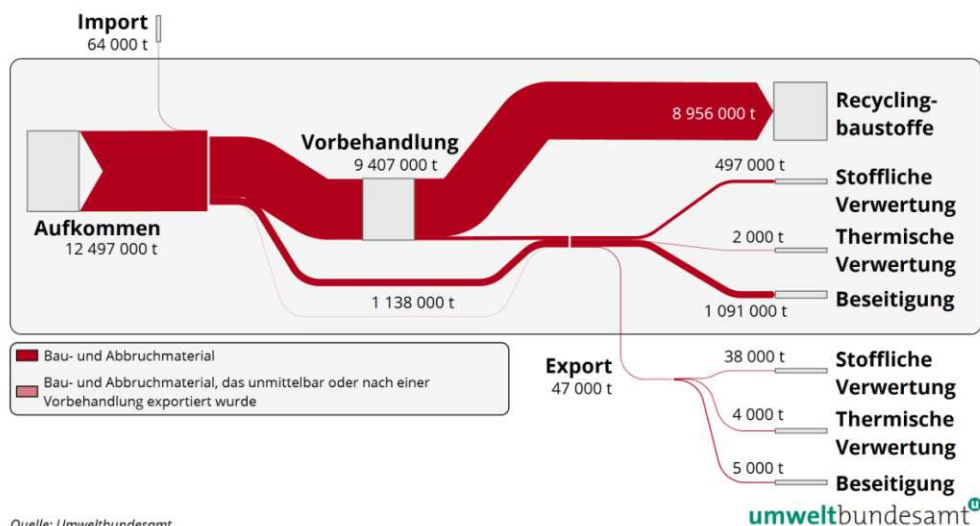


Abbildung 17: Stoffstrombild für Bau- und Abbruchabfällen (Referenzjahr 2021, in t). Quelle: Umweltbundesamt (2022), zitiert in Neubauer et al. 2022: S. 220

Für Verständnis dieser Daten in Bezug auf die Ziele der Ressourcenschonung ist allerdings die Erläuterung des Begriffes **Recycling-Baustoffe** notwendig. Als Recycling-Baustoffe werden die Materialien aus den Bau- und Abbruchabfällen sowie aus Aushubmaterialien bezeichnet, die nach der Aufbereitung entweder als technische Schüttungen, Tragschichten oder Zuschlagstoffe für die Produktion von Baustoffen wie Asphaltmischgut, Zement oder Beton verwendet werden (Neubauer et al., 2023: S. 75).

In diesem Zusammenhang wird diskutiert, dass Herstellung solcher Recycling-Baustoffe eine ressourcenverlustbringende Weiterverwertung, die sogenannte Downcycling darstellt. Ein Downcycling findet statt, wenn durch Verwertung nur Produkte niedrigerer Qualitätsebene bzw. mit einem geringeren Leistungsspektrum gegenüber dem Ausgangsmaterial entstehen können (Rosen, 2021: S. 46). Dabei wird zwischen einem höher- und einem minderwertigen Downcycling

unterschieden, insbesondere zwischen der Herstellung von Gesteinskörnung für Recycling-Beton, der am Ende des Lebenszyklus wieder recycelt werden kann, und dem bodennahen Einsatz als Ausgleichsmaterial oder Verfüllung (Müller et al., 2017: S. 50).

Ein Downcycling bei Baustoffen der mineralischen Stoffgruppe ist jedoch unvermeidbar, da deren Formgebungsprozess generell nicht reversibel ist (Hillebrandt, 2021: S. 54). Dennoch bringt das Downcycling von Bau- und Abbruchabfällen ökologische Vorteile mit sich, wie beispielsweise die Verwendung von Recycling-Baustoffen (z.B. Gesteinskörnungen aus Bau- und Abbruchabfällen als Ersatz für primären Kies) statt Primärrohstoffen für die Betonherstellung. Dadurch lassen sich Einsparungen bei Flächenverbrauch, Energie und CO₂-Emissionen im Vergleich zur Herstellung von Primärbeton erzielen (Mettke et al. 2015: S. 43-54).

Für ein hochwertiges Downcycling ist es essenziell, Abfallmassen zu möglichst homogenen und störstofffreien Materialien aufzubereiten, da die Qualität der Recycling-Baustoffe stark von der Sortenreinheit des Ausgangsmaterials abhängt (Dechantsreiter, 2015: S. 16 und S. 165).

Für Erreichung der Umweltvorteile wie Verringerung der CO₂-Emissionen bei Herstellung und Bereitstellung der Recycling-Baustoffe, stellt unter anderem der Faktor Transportdistanz zwischen Abbruch, Aufbereitung und Wiedereinbau eine wesentliche Voraussetzung dar (Mettke et al., 2015: S. 43-53; STRABAG, 2024). Beispielsweise laut dem Schweizer Baustandard Minergie Eco dürfen maximal 25 km Luftlinie zwischen der Baustelle und dem Betonwerk liegen, um die ökologischen Vorteile bei Verwendung des Recyclingbetons statt Primärbeton zu erzielen (Gugerli et al., 2015: S. 110).

In diesem Zusammenhang werden die Vorteile der städtischen Ballungsräume für die Herstellung und Verwendung von Recycling-Baustoffen deutlich. Insbesondere ermöglicht die räumliche Nähe zwischen den Abbruchbaustellen und den Einsatzorten in Neubaumaßnahmen die Einhaltung der kurzen Transportwege. Dadurch können Umweltvorteile durch Senkung der transportbedingten CO₂-Emissionen und des Energieaufwandes bei der Materialaufbereitung erzielt werden (Mettke et al., 2015; S. 43-53).

2.5. Zwischenfazit zum Kapitel 2

Kapitel 2 zeigt die Rolle des Bausektors als Verursacher der massenmäßig größten urbanen Stoffströme, sowie der beträchtlichen Umweltauswirkungen und Ressourcenverbrauchs deutlich auf. Insbesondere lässt die Analyse der Materialflüsse in Wien erkennen, dass die Bautätigkeit einen hohen Materialverbrauch sowie einen signifikanten Material- und CO₂-Fußabdruck aufweist und für einen erheblichen Anteil der gesamten Treibhausgasemissionen der Stadt verantwortlich ist. Die Haupttreiber dieser umweltbelastenden Effekte sind die Baumaterialien wie Beton, Stahl, Kies und Sand. Auch die Abfallströme bestehen zu 76% aus Abfällen der Bautätigkeit bzw. aus dem Abbruch und Aushub (*vgl. Kapitel 2.2 u. 2.3*).

Vor diesem Hintergrund lässt sich der Bausektor als wichtiges Ziel zur Ressourcenschonung und Dekarbonisierung in der Stadtentwicklung erkennen. Insbesondere sind dabei die Strategien und Maßnahmen zu erarbeiten und umzusetzen, die sowohl im Bau als auch im Recycling den Materialverbrauch und CO₂-Emissionen reduzieren können. Denn, obwohl Österreich bereits eine hohe Recyclingrate von 93% bei mineralischen Bau- und Abbruchabfällen erreicht hat, soll dabei beachtet werden, dass nicht nur Quantität, sondern vor allem die Qualität, insbesondere die CO₂-Einsparung und Nachhaltigkeit der Recyclingprozesse, für die positiven ökologischen Effekte des Recyclings entscheidend sind.

In diesem Zusammenhang kommt den urbanen Gebäudebeständen als wachsenden und dynamischen Ressourcenlagern eine besondere Aufmerksamkeit zu, denn eine umweltgerechte und wirtschaftliche Nutzung deren Ressourcen im Sinne des zirkulären urbanen Metabolismus lässt sowohl wirtschaftliche Vorteile erzielen als auch die Primärressourcen und Umwelt schonen.

Diese Erkenntnisse legen nahe, dass die Entwicklung und Umsetzung kreislauforientierter Planungsstrategien eine essenzielle Rolle spielen werden, um den Herausforderungen der Stadtentwicklung wie Ressourcenverbrauch und CO₂-Emissionen zu begegnen. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage: Welche Strategien und Ansätze können hierfür angewendet werden, sowie auf welchen theoretischen Überlegungen sie beruhen? Dies wird im nächsten Abschnitt diskutiert.

3. KONZEPTE UND STRATEGIEN DER KREISLAUFWIRTSCHAFT

3.1. Kreislaufwirtschaft: Definition, Strategien und Einordnung

Das Europäische Parlament definiert die Kreislaufwirtschaft als ein „Modell der Produktion und des Verbrauchs, bei dem bestehende Materialien und Produkte so lange wie möglich geteilt, geleast, wiederverwendet, repariert, aufgearbeitet und recycelt werden“ (Europäisches Parlament, 2023). Die angestrebten Ziele sind dabei die Verlängerung des Produktlebenszyklus, die Reduktion der Abfälle sowie ein langfristiger Verbleib der Ressourcen und Materialien in der Wirtschaft und daraus resultierende Wertschöpfung (ebd.).

Die Abbildung 18 zeigt eine idealisierte Darstellung der Kreislaufwirtschaft im Vergleich zu den Modellen einer Linear- und Recycling-Wirtschaft.

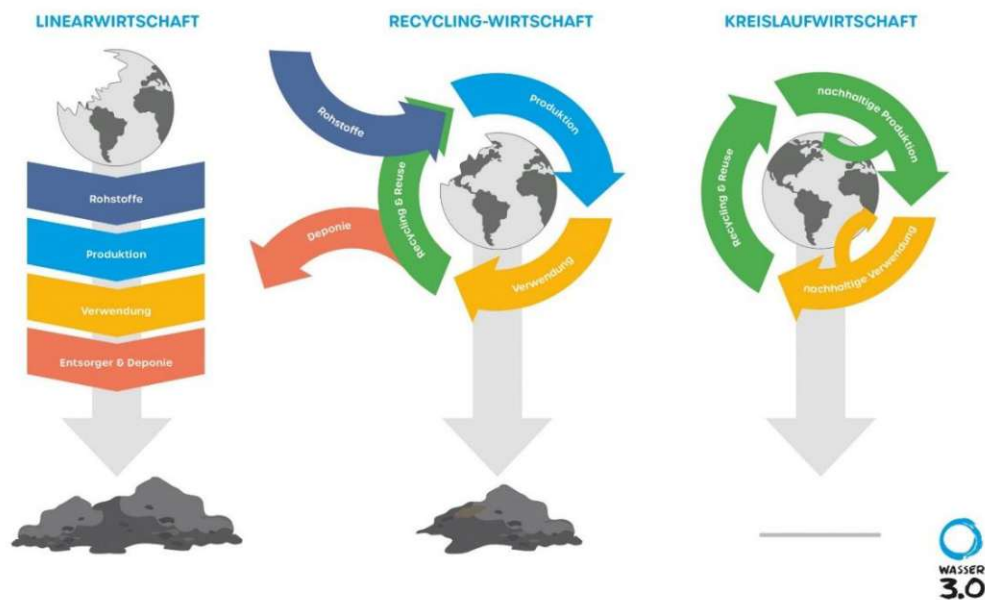


Abbildung 18: Konzepte der Linearwirtschaft, Recycling-Wirtschaft, Kreislaufwirtschaft. Quelle: Wasser 3.0

Eine lineare Wirtschaft basiert auf der Abfolge von Entnehmen, Produzieren, Verwenden und Entsorgen, wobei endliche Ressourcen mit hohem Aufwand aus der Natur genommen, in Industrieprodukte verarbeitet und nach einer relativ kurzen Nutzungsdauer schließlich entsorgt werden (Luger & Dorau, 2021: S. 8).

Eine Recycling-Wirtschaft ergänzt die lineare Wirtschaft durch die Komponenten Recycling und Reuse und stellt einen Schritt zur Kreislaufwirtschaft dar. Das Ziel dabei ist es, durch Sekundärrohstoffgewinnung aus Abfällen so viel wie möglich Primärrohstoffe in der Industrieproduktion zu ersetzen um den Energie- und Ressourcenverbrauch, sowie Umweltbelastung insbesondere die CO₂-Emissionen zu reduzieren (Wasser 3.0, 2023).

Eine ideale Kreislaufwirtschaft strebt danach, die bestehenden Ressourcen und Materialien in einem geschlossenen Stoffkreislauf der Herstellungs-, Vertriebs- und Verbrauchsprozesse so lange und intensiv wie möglich zu nutzen, um dadurch nicht nur den Abfall zu vermeiden, sondern auch Wertschöpfung zu generieren (BMK, 2022: S. 14; Europäisches Parlament, 2023; Wiegand, 2016: S. 6).

Die Verwirklichung einer vollständig geschlossenen und komplett abfallfreien Kreislaufwirtschaft aus der globalen Perspektive ist allerdings nicht erreichbar. Einerseits aufgrund der inhärenten Linearität einiger Ressourcen wie Nahrungsmittel oder Energie und andererseits aufgrund der aus dem Entropiegesetz hervorgehenden Unvermeidbarkeit der Materialverluste in einem Wirtschaftssystem (BMK, 2022: S. 14; Weiland, 1995: S. 149). Aus diesem Grund geht die Kreislaufwirtschaft davon aus, dass ein gewisser Anteil an Primärressourcen für die Produktion immer noch benötigt wird. Daher besteht eine der Prioritäten der Kreislaufwirtschaft darin, eine nachhaltige und umweltverträgliche Ressourcengewinnung zu unterstützen (BMK, 2022: S. 14). Das Konzept der Kreislaufwirtschaft deckt jeden Schritt der Wertschöpfungskette von der Materialgewinnung bis zur Materialrückgewinnung ab, wobei verschiedene Maßnahmen zur Energie- und Ressourceneffizienz, kreislauffähiger System- und Produktdesign („circular by design“), innovative Geschäftsmodelle und das Recycling von Produkten am Ende ihrer Lebensdauer in einem konsistenten Ganzen vereint werden (BMK, 2020: S. 14; Tercero Espinoza et al., 2020: S. 12).

Die Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft findet somit auf verschiedenen Ebenen statt. Dafür sind insbesondere die Entwicklung der kreislaufgerechten technischen Prozesse, Materialien, Strategien der Unternehmen und öffentlicher Hand sowie die Anpassung des gesellschaftlichen Konsums von Bedeutung (Stumpf & Baumgartner, 2022: S. 8-9). In dieser Komplexität und Vielfältigkeit der Kreislaufwirtschaft liegt sowohl ihr Unterschied von einer Recycling-Wirtschaft als auch ihr Potenzial durch ganzheitlichen Ansatz die Nachhaltigkeitsziele zu erreichen (ebd.).

Der Implementierung einer Kreislaufwirtschaft liegen verschiedene Strategien und Konzepte zu Grunde. Im Folgenden werden diese näher beleuchtet und im Kontext der Stadtentwicklung und des Bausektors untersucht.

3.1.1. Smart Klima City Strategie Wien: Aspekte der Kreislaufwirtschaft

Die Smart Klima City Strategie der Stadt Wien wurde im Jahr 2022 als eine überarbeitete Version der Smart City Wien Rahmenstrategie 2019 veröffentlicht, wobei die Klimaschutzziele nachgeschärft und präzisiert wurden, um dem Beschluss der Klimaneutralität Wiens bis 2040 auf der strategischen Ebene zu verankern (*Stadt Wien, 2022: S. 8-9*).

Mit der Smart Klima City Strategie reagiert die Stadt Wien auf die Herausforderungen des Stadtwachstums und der Stadtentwicklung, insbesondere im Hinblick auf den Ressourcenverbrauch und die Klimaschonung. Die Strategie definiert die Mission der Stadt Wien als „hohe Lebensqualität für alle bei größtmöglicher Ressourcenschonung durch umfassende soziale und technische Innovationen“. Darauf aufbauend setzt die Smart Klima City Strategie drei Leitziele fest: Lebensqualität, Ressourcenschonung und Digitalisierung (*ebd.: S. 16-17*).

Diese Leitziele werden in elf Zielbereichen konkretisiert, die verschiedene Maßnahmen und Ansätze zur Erreichung der spezifischen Zielen umfassen. Die Strategie betont dabei inhärente Synergieeffekte zwischen den Zielbereichen, die durch enge Wechselwirkungen und gegenseitige Verstärkung deren Zielen und Maßnahmen entfalten (*ebd.: S. 23-25*).

Das Leitziel Ressourcenschonung setzt bis 2040 die Senkung lokaler Treibhausgasemissionen um 55%, des Material-Fußabdruckes um 40% und des Energieverbrauchs um 45% fest. Der konsumbasierte Materialverbrauch wird dabei als „eine der Hauptursachen für die Treibhausgasemissionen“ betrachtet und daher in Fokus des Leitziels gestellt. Als Ansatz zur Reduktion des Materialverbrauchs wird die Etablierung einer Kreislaufwirtschaft mit dem „Zero Waste“ Prinzip vorgestellt, wobei die Abfallreduktion und -vermeidung, die Gewinnung von Sekundärrohstoffen und die Betrachtung der Gebäude als Rohstoffquellen als Schwerpunkte definiert sind (*Stadt Wien, 2022: S. 34*).

Durch die weitere Analyse der Zielbereiche und der darin verorteten Maßnahmen lässt sich ein integrierter Handlungsrahmen identifizieren, der verschiedene Maßnahmen zur Etablierung des kreislauffähigen Planens und Bauens umfasst, wobei durch Digitalisierung eine datengestützte Entscheidungsfindung und Prozessteuerung ermöglicht wird. Diese Maßnahmen beziehen sich stark auf die Planungs- und Bauprozesse der Stadtentwicklung und können daher als ein gesamtheitlicher Ansatz, der eine Wende zur Kreislaufwirtschaft im Bausektor anstrebt, betrachtet werden. Im Folgenden werden diese Maßnahmen nach entsprechenden Zielbereichen aufgelistet.

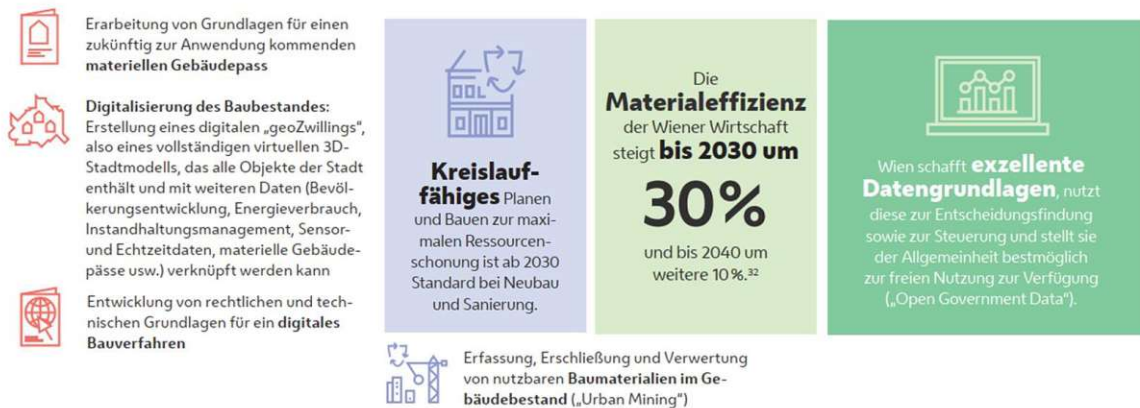


Abbildung 19: Überblick über die Zielbereiche und Maßnahmen der Smart City Strategie der Stadt Wien in Bezug auf die Kreislaufwirtschaft im Bausektor. Quelle: Eigene Zusammenfassung und Darstellung basierend auf Stadt Wien, 2022

Zielbereich GEBÄUDE

- „Neue Gebäude – seien es Wohnhäuser oder gewerblich genutzte Bauten – werden von Beginn an so geplant, dass der Material- und Energieverbrauch über den gesamten Lebenszyklus möglichst gering ist und **Baustoffe am Ende weitgehend wiederverwendet bzw. wiederverwertet werden können. Die Stadt selbst wird als Materiallager begriffen.**“
(Stadt Wien, 2022: S. 60-67)
- „**Entwicklung einer Kreislaufwirtschaftsstrategie für Gebäude und Infrastruktur** sowie eines detaillierten Umsetzungsfahrplans („Circular City Wien Roadmap“)*(ebd.)*
- „**Realisierung eines vollständig nach dem Prinzip der Kreislaufwirtschaft errichteten Stadtteils** auf dem Gelände des ehemaligen Nordwestbahnhofs – als innovatives Pionierprojekt in Kooperation von Forschung und Wirtschaft, Politik und Gesellschaft“
- „Adaptierung der Wiener Bauordnung sowie der baukulturellen Leitsätze **unter Berücksichtigung der Prinzipien der Kreislaufwirtschaft**“*(ebd.)*
- „Digitalisierung im Bauwesen vorantreiben: Baustoffe sollen auf wirtschaftliche Weise wiederverwendet bzw. -verwertet werden. **Dazu braucht es Wissen darüber, wo diese wann und in welcher Qualität verfügbar sind. Materialtransparenz soll durch Digitalisierung ermöglicht werden**“*(ebd.)*
- „Erarbeitung von **Grundlagen für einen zukünftig zur Anwendung kommenden materiellen Gebäudepass**“*(ebd.)*
- „Digitalisierung des Baubestandes: **Erstellung eines digitalen „geoZwillings“, also eines vollständigen virtuellen 3D-Stadtmodells, das alle Objekte der Stadt enthält und mit weiteren Daten (Bevölkerungsentwicklung, Energieverbrauch, Instandhaltungsmanagement, Sensor- und Echtzeitdaten, materielle Gebäudepässe usw.) verknüpft werden kann**“*(ebd.)*

- „Entwicklung von rechtlichen und technischen Grundlagen für ein digitales Bauverfahren“ (*ebd.*)
- **„Etablierung überregionaler Bauteilbörsen zur Materialvermittlung“** (*ebd.*)

Zielbereich WIRTSCHAFT & ARBEIT

- „Wien nutzt öffentliche Beschaffungsprozesse als Hebel, um Innovation anzustoßen, **etwa indem kreislauffähige Produkte, Leistungen und Geschäftsmodelle nachgefragt werden**, bevor sie vollständige Marktreife erlangt haben. Die ökologischen Einkaufskriterien der Stadt (‘ÖkoKauf’) werden unter den Gesichtspunkten Klimaschutz, Klimaanpassung und Kreislaufwirtschaft geprüft, weiter ausgebaut und verbindlich in der Stadtverwaltung und den städtischen Unternehmen angewandt.“ (*Stadt Wien, 2022: S. 70*)

Zielbereich ZERO WASTE & KREISLAUFWIRTSCHAFT

- **„Erfassung, Erschließung und Verwertung von nutzbaren Baumaterialien im Gebäudebestand („Urban Mining“)**“ (*Stadt Wien, 2022: S. 78*)

Zielbereich DIGITALISIERUNG

- „Daten als Grundlage der Smart City schaffen und nutzen: **Wien setzt – sofern verfügbar – digitale Daten und Anwendungen gezielt ein, um zur Erreichung und Evaluierung der Smart City Ziele beizutragen.**“ (*Stadt Wien, 2022: S. 111*)
- **„Schaffung einer gesamtstädtischen, aktuellen Datenbasis als Grundlage für die effiziente Erledigung städtischer Aufgaben** und Voraussetzung zur Entscheidungsfindung“ (*ebd.*)
- **„Entwicklung eines ‚Digitalen Zwillings‘ als digitales Abbild der Stadt**, das verschiedenste Datenquellen einbezieht (wie insbesondere IoT-Echtzeitdaten oder Stadt-Bilddaten). **Anwendungen wie diese steigern die Effizienz des Stadtmanagements** (etwa durch ‚predictive maintenance‘) **und zeigen Potenziale zur Reduktion von CO2-Emissionen auf.**“ (*ebd.*)

Daraus lässt sich auf die strategische Bedeutung der beschriebenen Maßnahmen hinsichtlich der Ziele der Stadt Wien und dadurch auf deren Bedeutung für eine ressourcen- und klimaschonende Stadtentwicklung schließen. Die Digitalisierung fungiert dabei als Unterstützung der Umsetzung dieser Maßnahmen durch Bereitstellung umfassender digitalen Grundlagen. Die identifizierten Maßnahmen sowie deren potenzielle Wechselwirkung mit Digitalisierung können als strategische Anforderungen an die kreislaufgerechte Stadtentwicklung betrachtet werden.

Dies bildet einen Orientierungsrahmen der vorliegenden Arbeit für die weitere konkrete Untersuchung von Ansätzen, die für die Etablierung der Kreislaufwirtschaft im Bausektor und in der Stadtentwicklung in Frage kommen. Daran anschließend werden digitale Tools untersucht, die dabei als Unterstützung dienen können.

In den darauffolgenden Kapiteln werden die im Kontext der identifizierten Maßnahmen der Smart Klima City Strategie erwähnten Begriffe, Konzepte und Instrumente sowie deren Rolle für die Ressourcen- und Klimaschonung in der Stadtentwicklung näher beleuchtet.

3.1.2. Cradle-to-Cradle: Systemkonzept der Kreislaufwirtschaft

„Der Übergang zum nachhaltigen Umgang mit Materialien und zur Kreislaufwirtschaft bedeutet einen fundamentalen Wandel der bestehenden industriellen und urbanen Systeme.“ (WBGU, 2016: S. 198).

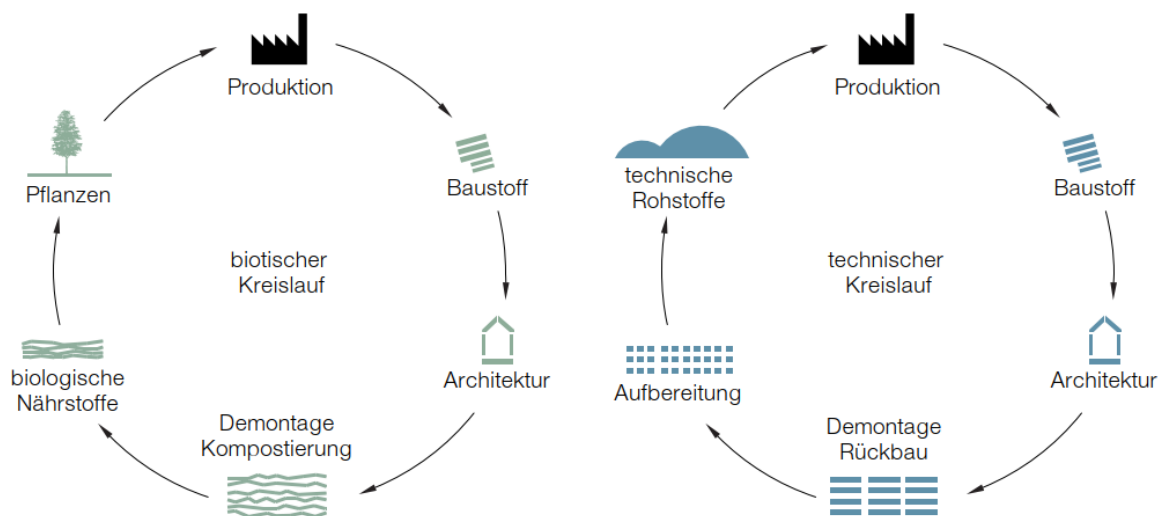
Eine bekannte Sichtweise auf die Kreislaufwirtschaft und einen fundamentalen Wandel anstrebende Denkschule stellt das vom deutschen Chemiker Michael Braungart und dem amerikanischen Architekten William McDonough entwickelte Konzept „Cradle-to-Cradle“ („von der Wiege bis zur Wiege“) dar. Der Name des Konzeptes spiegelt das Prinzip der Kreislaufwirtschaft wider und steht im Gegensatz zum Begriff „Cradle-to-Grave“ („von der Wiege bis zur Bahre“), der das lineare „take, make, waste“ Wirtschaftssystem bezeichnet (*McDonough, 2017, zitiert in Callahan*). Das Ziel des Konzeptes liegt darin, ein System herzustellen, in dem die Stoffströme in geschlossenen Kreisläufen zirkulieren, wobei Produkte am Ende der Nutzungsdauer wieder zu Nährstoffen für neue Produktion werden (*Braungart & McDonough, 2014: S. 123-124*).

Das Cradle-to-Cradle-Konzept überträgt somit das Kreislaufprinzip der Natur auf das Wirtschaftssystem und unterscheidet dabei zwischen einem biologischen und einem technischen Kreislauf, die getrennt voneinander funktionieren müssen. Im biologischen Kreislauf werden die Materialien und Produkte aus physikalisch oder biologisch abbaubaren Stoffen wieder gefahrlos in biologische Nährstoffe des Ökosystems überführt. Im technischen Kreislauf zirkulieren Produkte aus anorganischen Stoffen, die so entworfen, konstruiert und produziert werden müssen, dass sie nach dem Ende des Lebenszyklus wieder als technische Nährstoffe der industriellen Produktion eingesetzt werden können. Dabei ist es unbedingt notwendig, die Vermischung dieser Kreisläufe zu vermeiden, da ansonsten entweder „die biologischen Nährstoffe“ der Biosphäre verloren gehen oder der organische Stoffwechsel durch nicht biologisch abbaubare Stoffe beschädigt wird (*Braungart & McDonough, 2014: S. 135-136*).

Eine zentrale Rolle spielt dabei das Design der Produkte und Systeme, oder im Kontext der Stadtentwicklung und Gebäudebau die Planung und der Entwurf. Dabei müssen die Eigenschaften wie Sortenreinheit und Schadstofffreiheit, sowie das Recycling eingeplant werden. Als Hauptdesignprinzip gilt dabei die Vermeidung von Abfall und Gewährleistung der Möglichkeit, dass

darin verwendete „technische Nährstoffe“ im geschlossenen industriellen Kreislauf und „biologische Nährstoffe“ im biologischen Kreislauf weiterzirkulieren können (Braungart & McDonough, 2014: S. 135-146). Das Wirtschaftsprinzip beruht dabei auf dem Konzept eines „Dienstleistungs- und Serviceproduktes“. Dieses Prinzip bedeutet, dass Produkte am Ende ihrer „Nutzerzeit“ vom Hersteller zurückgenommen werden, um die darin enthaltenen Materialien für Herstellung neuer Produkte zu verwenden. Die Hersteller bleiben die Eigentümer der Materialien und die Verantwortlichen für ihre Wiederverwendung oder Recycling. Dadurch können sie sowohl Ersparnisse an Materialkosten für die neue Produktion als auch eine anhaltende Wertschöpfung erzielen, während die Umwelt von der Ressourcenschonung und der Umweltverträglichkeit der Produkte profitieren soll (ebd.: S. 144-145).

Im Kontext der Bauwirtschaft lässt sich das Cradle-to-Cradle Konzept als eine umweltverträgliche, rückbaubare und wiederverwendbare Konstruktion und materielle Zusammensetzung der Gebäude interpretieren (Schneider, 2020: S. 458). Je nach der Materialität der Bauteile können Gebäude ein Teil des sowohl biologischen als auch des technischen Kreislaufs bilden (Hillebrandt & Seggewies, 2018: S. 60).



B 2.2

Abbildung 20: Biotischer und technischer Verwertungskreislauf im Kontext der Bauwirtschaft. Quelle: Hillebrandt & Seggewies, 2018: S. 60

Durch naturnahe Gebäudegestaltung wie beispielsweise durch Fassaden- und Dachbegrünung kann das Gebäude in den biologischen Kreislauf eingebettet werden, indem die Begrünung als Bestandteil des Wasserkreislaufs oder als Biotop funktioniert und somit die Natur mit Nährstoffen versorgt (Schneider, 2020: S. 458).

Der gesamtheitliche Ansatz des Cradle-to-Cradle-Konzeptes strebt eine „Öko-Effektivität“ des Wirtschaftsmodells an, wobei die intelligenten Designlösungen der Produkte – wie Gebäude – und

der Systeme – wie Städte – die Entkopplung des Wirtschaftswachstums vom Ressourcenverbrauch, sowie die Erhöhung der Lebensqualität erzielen und somit Mehrwerte sowohl für die Umwelt als auch für die Menschen schaffen können. Die einzelnen Konzeptprinzipien umfassende Idee lautet dabei: *„die Arbeit an den richtigen Dingen – an den richtigen Produkten und Dienstleistungen und Systemen – statt darum, die falschen Dinge weniger schlecht zu machen“* (Braungart & McDonough, 2014: S. 103).

3.1.3. R-Strategien: Strategischer Rahmen der Kreislaufwirtschaft

Ein anerkanntes Konzept zur Operationalisierung der Kreislaufwirtschaft beruht auf drei R-Prinzipien oder R-Strategien: Reduce (Reduktion), Re-Use (Wiederverwendung), Recycle (Verwertung), mit dem übergeordneten Ziel, den Abfall auf das Minimum zu reduzieren, Primärressourcen zu schonen sowie CO₂-Emissionen bei Gewinnung und Verwendung von Rohstoffen zu senken (Luger & Dorau, 2021: S. 14; Kirchherr et al., 2017: S. 223). Hierbei schlagen Luger & Dorau (2021) die Erweiterung dieses Rahmens um das vierte Element – Long-Use oder Langlebigkeit – *„um den für das kreislaufwirtschaftliche Denken zentralen Aspekt der Langlebigkeit prominent hervorzuheben“* (Luger & Dorau, 2021: S. 21).

Die Zusammensetzung dieser vier R-Strategien kann als ein strategischer Rahmen betrachtet werden, der die strategischen Imperative zur Umsetzung der Kreislaufwirtschaft umfasst. Eine inhärente Eigenschaft dieses Rahmens ist die Hierarchie der R-Strategien (Abbildung 21), die dessen Potenzial für Ressourcenschonung widerspiegelt (Potting et al., 2017: S. 14-15).



Abbildung 21: Hierarchie der R-Strategien. Eigene Darstellung anlehnd an Luger & Dorau, 2021 und Hillebrandt, 2018

Auf der obersten Stufe befindet sich **Reduce** als Strategie zur Vermeidung des zukünftigen Abfalls durch Planungs- oder Produktdesignlösungen (Stumpf & Baumgartner, 2022: S. 6). Daran schließt sich der Prinzip des **Long-Use** als Verlängerung des Produktlebenszyklus sowohl durch planerischen

oder designbezogenen Lösungen als auch durch Reparatur und Wartung (Luger & Dorau, 2021: S. 21; Reike et al., 2018: S. 11). Die Strategie des **Re-Use** zielt darauf ab, ein gebrauchtes Produkt direkt oder nach einer minimalen Anpassung erneut einzusetzen (Hillebrandt & Seggewies, 2018: S. 59; Reike et al., 2018: S. 11). Auf der untersten Stufe befindet sich die Strategie des **Recyclings** als Behandlung des bereits entstandenen Abfalls (Kirchherr et al., 2017: S. 223).

Im Kontext der Stadt- und Gebäudeplanung kann die mögliche Umsetzung dieser Strategien wie folgt interpretiert werden.

Die **Reduce-Strategie** bedeutet die Reduktion des Primärressourcenverbrauchs durch die Nutzung von vorhandenen Ressourcen und Potenzialen wie Böden, Flächen oder Gebäuden (LUBW, 2024; Hillebrandt, 2018: S. 10; Romm & Kasper, 2018: S. 36). Die Ressource Boden kann je nach Beschaffenheit direkt am Bauplatz für Betonzuschlag, Massenausgleich, Geländemodellierung sowie für Dach- und Gebäudebegrünung verwendet werden. Solche lokale Verwertung von Aushub lässt sowohl den Einsatz von Primärressourcen verringern als auch den Schwerlastverkehr reduzieren und Deponievolumen schonen, insbesondere weil der Aushub in der Regel von der Baustelle als Abfall weggeführt wird (Romm & Kasper, 2018: S. 36; Romm, 2024). Die Verwendung von Flächenpotenzialen im Sinne von Nachverdichtung, Baulückenschließung und Aufstockung lässt die Landvernichtung und Ressourcenaufwand für die neuen Infrastrukturen vermeiden (Hillebrandt et al., 2018: S. 10). Die Weiterverwendung oder Nachnutzung von Bestandsgebäuden oder deren Tragstrukturen im Sinne von Revitalisierung oder Sanierung des Bestandes lässt einen erheblichen Ressourceneinsatz für den Ersatzneubau vermeiden und damit die effizienteste Strategie hinsichtlich der Primärressourcenschonung und der CO₂-Einsparung darstellt (Hillebrandt, 2018, S. 11; Angehrn, 2024; Romm, 2024).

Die Umsetzung der **Long-Use Strategie** kann als „Schaffung nutzungsflexibler, wartungs- und reparaturfähiger Strukturen“ verstanden werden (Luger & Dorau, 2021: S. 21). Die Voraussetzung dafür sind „langlebige Raumstrukturen, die ohne großen Material- und Ressourcenaufwand gewartet, repariert und an sich wandelnde Anforderungen angepasst werden können“ (ebd.). Die Long-Use Strategie kann als eine Erweiterung der Reduce-Strategie betrachtet werden, indem durch dauerhafte und flexible Nutzung des Gebäudes der für Umbauten oder Anpassungen notwendiger Ressourceneinsatz verringert oder vermieden wird.

Die **Reuse-Strategie** umfasst zwei wesentliche Aspekte. Der erste Aspekt bezieht sich auf die Wieder- oder Weiterverwendung von demontierten Bauteilen. Hierbei werden die Bauteile aus Rückbau- oder Sanierungsgebäuden, aus sogenannten Quellobjekten, in Zielobjekten eingebaut und damit wiederverwendet (Angst et al., 2023: S. 7). Die Wiederverwendung (Abbildung 22) bedeutet die Verwednung von Bauteilen direkt nach der Demontage unter Beibehaltung deren ursprünglichen Funktionen, z.B. erneuter Einbau der ausgebauten Mauerziegel (Hillebrandt et al.,

2018: S. 219). Die Weiterverwendung (Abbildung 22) bedeutet die Verwendung von demontierten Bauteilen entweder direkt oder nach einer geringen Anpassung für eine andere Funktion als die ursprüngliche, sowie mit einem niedrigeren Qualitätsanspruch (Hillebrandt et al., 2018: S. 219; Reike et al., 2018: S. 11), wie beispielsweise alte Fassadenklinker als Gartenwegbelag (Hillebrandt & Seggewies, 2018: S. 60).

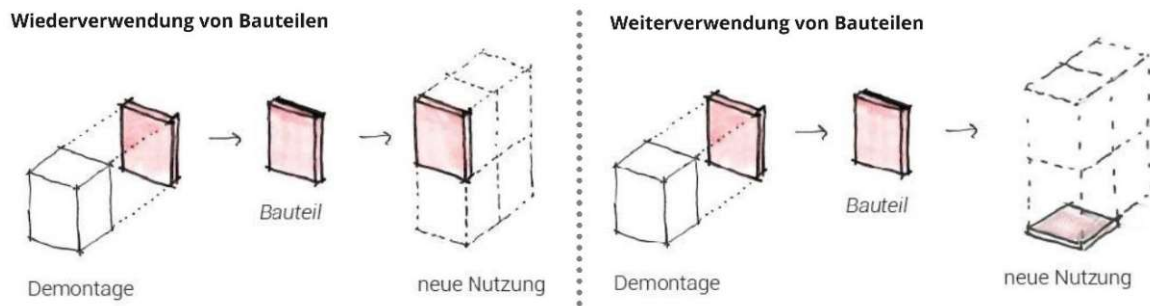


Abbildung 22: Konzepte der Wieder- und Weiterverwendung von Bauteilen. Quelle: Oefner et al., 2024

Der zweite Aspekt der Reuse-Strategie richtet sich auf die Planung von Neubauten unter Berücksichtigung des zukünftigen Rückbaus (LUBW, 2024). Das Ziel dabei ist es mittels verschiedener Planungslösungen wie rückbaufähiges Tragwerk, lösbare Verbindungen und Verzicht auf Verbundmaterialien die Demontage von Bauteilen im späteren Um- oder Rückbau zu vereinfachen, um eine effizientere Wieder- oder Weiterverwendung am Ende des Gebäudelebenszyklus zu ermöglichen (LUBW, 2024; Hillebrandt, 2018, S. 12).

Im Rahmen der **Recycling-Strategie** werden die Bauteile, die nicht erhalten bzw. weiterverwendet werden können, einem Wieder- oder Weiterverwertungsprozess zugeführt (Reike et al., 2018: S. 12)

Die Bauteile werden zerlegt oder zerstört und daraus entstandene Altstoffe zu neuen Materialien der gleichen oder einer niedrigeren Qualitätsstufe aufbereitet. Eine Wiederverwertung findet hierbei statt, wenn beispielsweise ein Stahlträger eingeschmolzen und zu einem neuen Träger anderer Form, aber ohne Qualitätsverlust verarbeitet wird. Falls jedoch aus dem Prozess nur Material niedrigerer Qualität entsteht, wie bei der Umwandlung von Flachglas in Profilbauglas, spricht man von Weiterverwertung (Hillebrandt & Seggewies, 2018: S. 60).

Stumpf & Baumgartner (2022) betonen, dass Projekte in der Kreislaufwirtschaft häufig nur auf einer niedrigeren Ebene der R-Strategien, wie etwa Recycling, angesiedelt sind. Für die Etablierung einer effizienten Kreislaufwirtschaft ist es jedoch essenziell, die Projekte mehrdimensional – als Kombination mehrerer Strategien – zu gestalten, auch wenn die Konzeption und Umsetzung dadurch komplexer und aufwendiger werden (Stumpf & Baumgartner, 2022: S. 5-6).

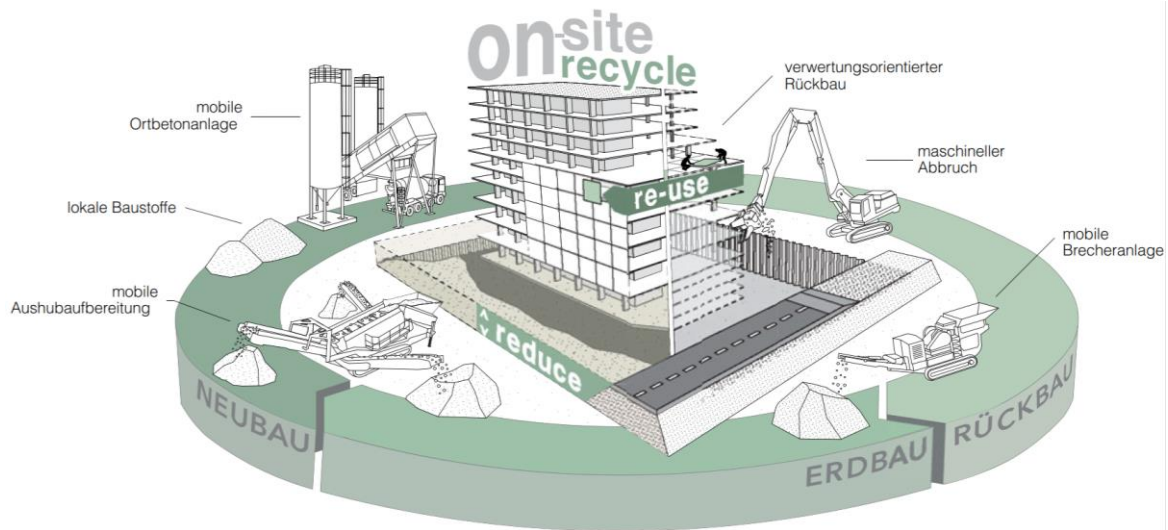


Abbildung 23: R-Strategien der Kreislaufwirtschaft auf der Baustelle: Reduce, Reuse, Recycle. Quelle: Romm & Kasper, 2018

Ein idealisiertes Beispiel der Anwendung von R-Strategien im Kontext eines Bauprojektes stellt die Abbildung 23 dar, die ein umfassendes System kreislaufwirtschaftlicher Maßnahmen aufzeigt. Hierbei werden die R-Strategien effizient kombiniert: Lokale Baustoffe und mobile Aushubaufbereitungsanlagen ermöglichen den Einsatz von vor Ort gewonnenem Material, was einerseits das Wegführen und Deponierung des Aushubs und andererseits den Primärrohstoffverbrauch verringert (**Reduce**). Demontierte Bauteile aus dem Rückbau werden im Neubau direkt eingebaut und wiederverwendet (**Reuse**). Die mobile Beton- und Brecheranlage ermöglichen die Wiederaufbereitung von Abbruchmaterialien vor Ort (**Recycle**). Diese Kombination mehrerer Ansätze reduziert nicht nur den Abfall und den Bedarf an neuen Materialien, sondern auch den Transportaufwand und die damit verbundenen Emissionen, wodurch ein hohes Potenzial einer integrierten Kreislaufwirtschaft erschlossen werden kann.

3.2. Urban Mining: Kreislaufwirtschaft im anthropogenen Ressourcenlager

3.2.1. Urban Mining: Definition und Einordnung

Das Konzept des Urban Mining, wörtlich übersetzt als „städtischer Bergbau“, betrachtet Städte als „urbane Minen“ und somit potenzielle Quellen für Sekundärrohstoffe, die eine ressourcenschonende Alternative für aus der Natur gewonnenen Primärrohstoffe darstellen (Müller et al., 2017: S. 17; Tercero Espinoza et al., 2020: S. 9, S. 26).

Cossu & Williams (2015) ordnen das Urban Mining als einen Bestandteil der Gesamthierarchie der Kreislaufwirtschaft ein, insbesondere als Teilprozess des Materialrecycling und der allgemeinen Ressourcenrückgewinnung aus dem bereits entstandenen Abfall (Abbildung 24). Das Urban Mining umfasst dabei die Aktivitäten zur Wiedergewinnung und zum Recycling von Sekundärrohstoffen, die in allen anthropogenen Lagerstätten gelagert sind, einschließlich Gebäuden, Infrastrukturen, Industrien, Produkten (im Gebrauch und außer Gebrauch) etc. Das Urban Mining erweitert damit das „Landfill-Mining“ oder den „Deponie-Bergbau“, wobei die Sekundärrohstoffe aus den spezifischen Deponien wie kommunale Mülldeponien gewonnen werden (Cossu & Williams, 2015: S. 1).



Abbildung 24: Einordnung des Urban Mining in den Kontext der Kreislaufwirtschaft und Ressourcengewinnung. Quelle: Cossu & Williams, 2015: S. 1, eigene Übersetzung und grafische Anpassung

Das Urban Mining umfasst den abschließenden Abschnitt der Kreislaufschleife (Abbildung 4, Abbildung 18), indem es Produkte und Güter am Ende ihrer Nutzungszyklus durch verschiedene Recycling und Re-Use-Ansätze – wie Weiterverwertung, Weiterverwendung, Wiederverwendung und Wiederverwertung – in die Wirtschafts- und Wertschöpfungskette zurückführt. Außer Betracht bleiben hierbei Produkte wie Kraftstoffe oder Lebensmittel, die für den direkten Verbrauch bestimmt sind und somit kein anthropogenes Lager bilden (Tercero Espinoza et al., 2020: S. 12; Müller et al.: S. 29).

Die Abbildung 25 stellt die Einordnung des Urban Mining in die Struktur der Materialflüsse, die zum Aufbau der Gesamtmengen der Materialressourcen beitragen, sowie durch die Ressourcennutzung

entstehen. Das Urban Mining stellt dabei einen wichtigen Prozess zur Gewinnung von Sekundärrohstoffen aus anthropogenen Lagerbeständen dar.

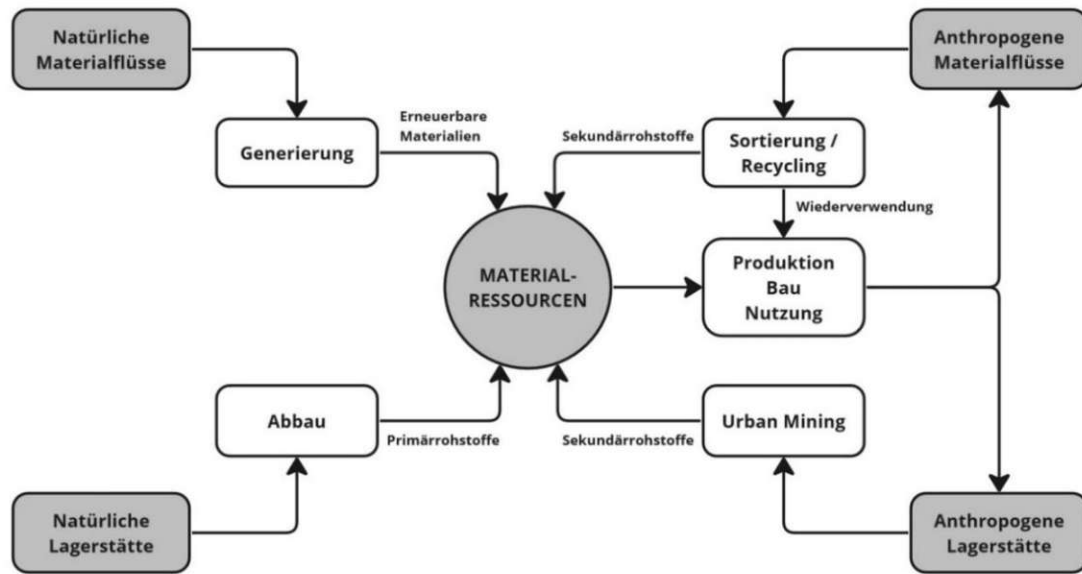


Abbildung 25: Materialflüsse zwischen natürlichen und anthropogenen Ressourcenquellen. Quelle: Cossu & Williams, 2015: S. 2, eigene Übersetzung

Ähnlich zu kurz- und langfristigen Stoffströmen (vgl. Kapitel 2.1) lassen sich die anthropogenen Lagerstätte in kurz- und langfristige „urbanen Minen“ aufteilen, die sich nach der Dauer der Nutzungszyklen der enthaltenen Produkte und Güter entsprechend bestimmen lassen (Schnitzer, 2021: S. 56). Wie die Abbildung 26 zeigt, die Gebäude und Infrastrukturobjekte bilden eine langfristige „urbane Mine“ und stellen somit den Zielgegenstand des Urban Mining im Kontext der Bauwirtschaft und Stadtentwicklung dar.

Eine der zentralen Aufgaben, mit der sich das Urban Mining beschäftigt, ist die Ermittlung der Größe der urbanen Minen, bzw. der Information über die Mengen und Zeitpunkte der Verfügbarkeit der darin enthaltenen Ressourcen (Richthofen et al., 2017: S. 306). Eine bedeutende Rolle spielt dabei die Bewertung des tatsächlich verfügbaren Anteils am Gesamtbestand der jeweiligen „urbanen Minen“ sowie der Wirtschaftlichkeit und technologischer Möglichkeit ihres Abbaus (Lederer et al., 2014: S. 369). Bei der Untersuchung des Abbaupotenzials wird zwischen „Ressourcen“ und „Reserven“ unterschieden. Die „Ressourcen“ sind die Gesamtmenge aller in den anthropogenen Lagerstätten vorhandenen Materialien, während die „Reserven“ eine Teilmenge der „Ressourcen“, die unter den derzeitigen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen gewinnbar sind, darstellen (McKelvey, 1973, zitiert in Allesch et al. 2018: S. 21). Wie die Abbildung 26 zeigt, spielt das Wissen über die Zusammensetzung der Materialbestände eine wichtige Rolle für die effiziente Bewirtschaftung der darin enthaltenen Ressourcen.

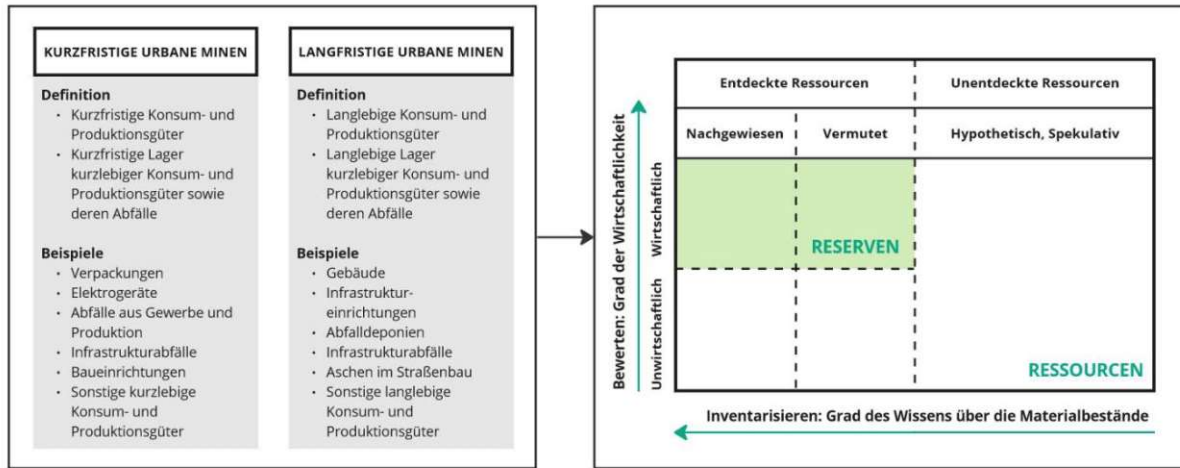


Abbildung 26: Urbane Minen und deren Abbaupotenzial. Eigene Darstellung auf Basis von: Schnitzer, 2021: S. 56 (Urbane Minen) und McKelvey, 1976; Kral et al., 2017, zitiert in Allesch et al., 2018: S. 21 (Ressourcen und Reserven)

Im Gegensatz zum herkömmlichen Verständnis, das Urban Mining als jede Form des Recyclings auffasst (Cossu & Williams, 2015: S. 1), unterscheidet sich das Urban Mining von der Abfallwirtschaft durch die Systemgrenzen der Betrachtung sowie durch Orientierung an das Lebenszyklus und Lagerdynamik der „urbanen Minen“ (Müller et al., 2017: S. 17). Während die Abfallwirtschaft sich primär auf Mengen, Zusammensetzung und schadstofffreie Wiederverwertung von Abfällen konzentriert, liegt das Ziel des Urban Mining darin, nicht nur den Materialbestand zu erkunden und daraus die Sekundärrohstoffe zu gewinnen, sondern auch zukünftige Stoffströme zu prognostizieren, um effiziente Verwertungswege zu identifizieren, bevor Materialien zu Abfall werden (ebd.).

Somit lässt sich Urban Mining als ein strategischer Ansatz zur Schließung der Materialkreisläufe und eine „systematische, zielorientierte Planung, Gestaltung und Mehrfachnutzung von anthropogenen Materialbeständen zum Zweck der optimalen Ressourcenschonung und des langfristigen Umweltschutzes“ definieren (Brunner & Kral, 2013: S. 251).

Brunner & Kral (2013) definieren vier Eckpfeiler auf die sich die Implementierung des Urban Mining als Gesamtstrategie stützt:

Design for Urban Mining

Produkte, Verfahren und Systeme sind so zu gestalten, dass sie eine langfristige und mehrfache Nutzung sowie eine sortenreine Trennung der darin enthaltenen Materialien ermöglicht wird. Diese Aspekte müssen bereits in der Planungs- oder in der Produktdesignphase berücksichtigt werden, um die Produkte und Güter zu schaffen, die sich „mit geringem Aufwand an Energie und materiellen Ressourcen in stofflich einheitliche, wiederverwertbare Sekundärrohstoffe umwandeln lassen“ (Brunner & Kral, 2013: S. 251). Im Kontext der Stadt- und Gebäudeplanung bedeutet dies die Anwendung von Planungsansätzen, die Aspekte der Nachnutzung von Objekten und Standorten, des Rückbaus

sowie der Kreislaufführung der Baumaterialien berücksichtigen. Dabei müssen die unterschiedlichen Planungsmaßstäbe mitgedacht werden, um der Komplexität und den Unterschieden zwischen der Gebäude- und Stadtplanung gerecht zu werden. Die entsprechenden Ansätze des Design for Urban Mining werden im Kapitel 3.2.2 näher beleuchtet.

Urbane Prospektion

Analog zum traditionellen Bergbau benötigt Urban Mining Methoden zur Identifizierung und Bewertung von möglichen Quellen urbaner Ressourcen. Um das Urban Mining wirtschaftlich tragfähig, insbesondere im Vergleich zur Primärrohstoffgewinnung, zu gestalten, sind die Methoden notwendig, die Informationen über die Menge, Beschaffenheit und Verortung von Sekundärrohstoffen erheben lassen (*Brunner & Kral, 2013: S. 251*). Wird dabei der Gebäudebestand als Materialquelle betrachtet, sind Informationen über die Nutzung, stoffliche Zusammensetzung und vorgesehene Nutzungsdauer der Gebäude erforderlich, um eine Aussage über die potenziell anfallenden Mengen und Kategorien der Baumaterialien sowie über den Zeitraum ihrer potenziellen Freisetzung durch Gebäudeabriss treffen zu können. Das Wissen über die Materialflüsse und -bestände im Gebäudebestand ist laut Lederer et al. (2020) eine wichtige Voraussetzung für die Verringerung der Umweltauswirkungen der Verwendung der Baumaterialien sowie der Behandlung der Bau- und Abbruchabfälle. Aufbauend auf diesen Informationen können die datengestützten Entscheidungen zum städtischen Stoffstrommanagement getroffen sowie die entsprechenden Maßnahmen zur Reduktion des Baumaterialverbrauchs erarbeitet werden (*Lederer et al., 2020*).

Ressourcenkataster

Ein Ressourcenkataster stellt ein systematisches Verzeichnis mit Informationen über die Verortung, Zusammensetzung, Mengen und voraussichtliche zeitliche Verfügbarkeit der Sekundärrohstoffe in einer Stadt dar. Insbesondere werden darin die Daten über Maße, Mengen und Beschaffenheit der in Bauwerken verbauten Materialien und Bauteile erfasst. Diese Daten sollen am Ende der Objektlebensdauer als Informationsgrundlage den selektiven Rückbau und die sortenreine Trennung der Materialien in Abrissgebäuden unterstützen. Über die Bestandsaufnahme hinaus, ermöglicht ein Ressourcenkataster die Massen, Konzentrationen und Vergesellschaftungen der Stoffe im Gebäudebestand zu erkennen sowie den Zeitpunkt deren Freisetzung für das Urban Mining auf lokaler oder regionaler Ebene zu prognostizieren (*Brunner & Kral, 2013: S. 252*).

Als Eckpfeiler des Urban Mining lässt sich das Ressourcenkataster als ein digitales Instrument des Urban Mining betrachten, der für die Aufgaben der urbanen Prospektion eingesetzt werden kann. Durch Bereitstellung der relevanten Informationen über die im Gebäudebestand enthaltenen

Materialien, kann das Ressourcenkataster die Erkundung der urbanen Minen sowie die Prognose der in einer Stadt anfallenden Stoffströme unterstützen.

Hightech für Trennung und Rückgewinnung

Für die Prozesse der Gewinnung der Sekundärrohstoffe aus Materialbeständen besteht ein Bedarf an fortschrittlichen Technologien, um die wertvollen Stoffe sortenrein und wirtschaftlich aus den komplexen Gemischen zu extrahieren und diese von den Schadstoffen zu separieren. Damit einher geht die Notwendigkeit der Entwicklung von physikalischen, physikalisch-chemischen und chemischen Prozessen, die eine stoff- und energieeffiziente Rückgewinnung der Sekundärrohstoffe ermöglichen. Ebenso wichtig ist die Schaffung von umweltverträglichen Endlagern, der sogenannten „letzten Senken“, für die aus den Recyclingprozessen verbleibenden Rückstände (*Brunner & Kral, 2013: S. 252*).

Aus der Perspektive von Brunner & Kral wird deutlich, dass das Urban Mining als Gesamtstrategie nicht nur auf die Erkundung und Erschließung der Ressourcen in anthropogenen Lagerstätten begrenzt ist, sondern auch spezifische Planungsansätze erfordert, die die Effizienz nachfolgender Urban-Mining-Prozesse gewährleisten können. In weiteren Kapiteln wird näher auf die Frage eingegangen, mit welchen planerischen Methoden und Instrumenten das Urban Mining als umfassende Planungs- und Ressourcengewinnungsstrategie im Kontext der Bauwirtschaft und Stadtentwicklung implementiert werden kann.

3.2.2. Design for Urban Mining: Dimensionen der kreislaforientierten Planung

In der Diskussion um Kreislaufwirtschaft und Urban Mining wird einer umfassenden und nach Prinzipien der Kreislaufwirtschaft ausgerichteten Planung, einem „Design for Urban Mining“ (*Brunner & Kral, 2013; siehe Kapitel 3.238*) oder „Urban-Mining-Design“ (*Hillebrandt, 2018*), eine zentrale Bedeutung für das Schließen von Ressourcenkreisläufen in der Stadtentwicklung und Bauwirtschaft beigemessen. Ein grundlegender Aspekt des Urban-Mining-Designs ist das Umdenken der konventionellen Planungs- und Entwurfsprozessen zur Konzipierung der Bauwerke als ein Zwischenlager verschiedener Ressourcen, die am Ende ihrer Lebensdauer wieder zugänglich und nutzbar sein sollen. Als umfassender Ansatz ist das Urban-Mining-Design in einem komplexen Wirkungsgefüge der Stadt und ihrer Bebauung verankert, wobei sich die Stoffkreisläufe auf Stadt- und Gebäudeebene in einer wechselwirkenden Abhängigkeit befinden (*Schneider, 2021: S. 459*).

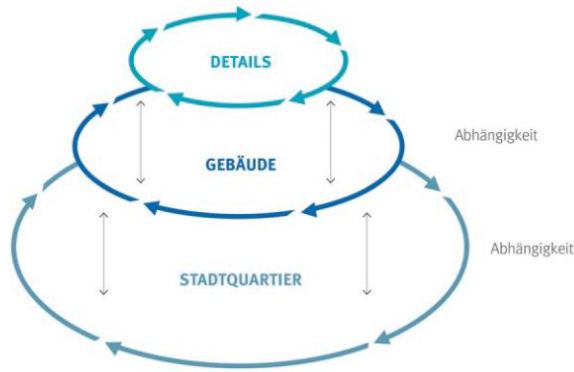


Abbildung 27: Abhängigkeit der Stoffkreisläufe auf unterschiedlichen räumlichen und planerischen Ebenen. Quelle: Schneider, 2021

Ein Gebäude wird dabei als technisches System betrachtet, das so geplant werden muss, dass die Ressourcenkreisläufe aus den darin enthaltenen Materialien generiert werden können (*ebd.*). Auf der Ebene der städtebaulichen Planung werden lokale Potenziale wie Flächen, Bausubstanz oder Böden als Ressourcen betrachtet, die es ebenfalls kreislaufgerecht und effizient anzuordnen und zu nutzen gilt, um den Einsatz neuer Ressourcen zu verringern (Luger & Dorau, 2021: S. 22; Hillebrandt, 2018: S. 10; Achatz et al., 2021: S. 6).

Diese Sichtweise kann anhand des Schichtenmodells von Stewart Brand (1994) veranschaulicht werden.

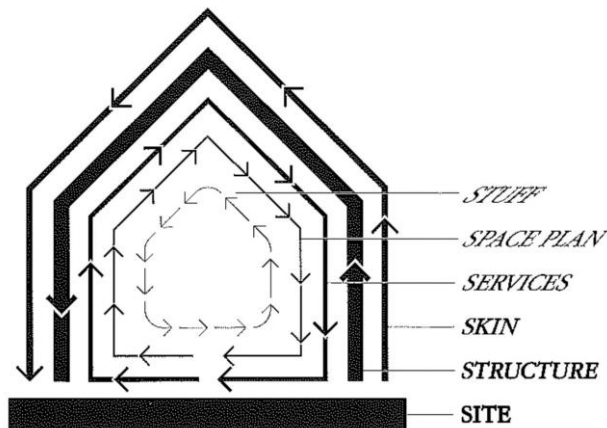


Abbildung 28: Schichtenmodell des Gebäudes. Quelle: Brand, 1994

Dieses Modell stellt ein Gebäude als Objekt aus mehreren Schichten mit unterschiedlichen Lebensdauern dar (Brand, 1994: S. 13).

Standort (Site) – Die geografischen Gegebenheiten, die städtische Lage, die Grenzen und die rechtlichen Rahmenbedingungen des Grundstücks.

„Der Standort ist ewig“ (Brand, 1994: S. 13, eigene Übersetzung).

Gebäudestruktur (Structure) – Das Fundament und die tragenden Elemente, die Struktur und Kubatur des Gebäudes bestimmen. Ihre Lebensdauer spannt von 30 bis 300 Jahre.

Gebäudehülle (Skin) – Die Außenschichten wie Fassade und Dachbelag. Diese werden alle 20 Jahre renoviert oder ausgetauscht.

Haustechnik (Services) – Die technische Gebäudeausstattung, die sich innerhalb von 7 bis 15 Jahren abnutzt. Ein schwer zugänglicher Einbau der Leitungssysteme kann den Austausch erschweren und somit eine vorzeitige Abrissentscheidung verursachen.

Innenraumplan (Space Plan) – umfasst Elemente der Raumgestaltung wie Trennwände, Türen sowie Boden- und Deckenbekleidungen. Bei intensiver gewerblicher Nutzung können diese alle 3 Jahre ausgetauscht werden. In den Wohnungen alle 30 Jahre.

Inneneinrichtung (Stuff) – Möblierung, Haushaltsgeräte und sonstige Gegenstände mit kurzen Nutzungsdauern von Tagen bis Monaten je nach Nutzung und Qualität.

Die Aufgabe der kreislauforientierten Planung, des Urban-Mining-Designs, besteht hierbei darin, den Lebenszyklus der verschiedenen Gebäudeschichten zu berücksichtigen. Schichten wie der **Innenraumplan**, die **Haustechnik** oder die **Gebäudehülle**, die kürzere Nutzungsdauern aufweisen, müssen sortenrein trennbar und leicht austauschbar sein. Dies vereinfacht die Zurückführung deren Materialien in die Stoffkreisläufe und zur Nutzungsflexibilität und daher Langlebigkeit des Gebäudes beiträgt. Die Schichten **Standort** und **Gebäudestruktur** sollen Anpassbarkeit und Vielfalt der Nutzungsszenarien des Objektes ermöglichen, um den Lebenszyklus so lange wie möglich zu halten. Angesichts der physischen Endlichkeit der Gebäudestruktur soll auch ihr Materialität ein effizientes Recycling ermöglichen (*Luger & Dorau, 2021: S. 23-28*).

Das Gebäudeschichtensystem kann zwischen zwei Planungsmaßstäben geteilt werden. Die Schicht **Standort** sowie der übergeordnete Aspekt der **Gebäudestruktur** im Sinne von Bebauungsplanung können als Domäne der Stadtplanung betrachtet werden. Die detaillierte Ausarbeitung der **Gebäudestruktur** sowie die weiteren Schichten bis hin zum **Innenraumplan** fallen in den Bereich der statisch-architektonischen Planung. Diese Maßstabpalette des Urban-Mining-Designs in der Stadt- und Gebäudeplanung lässt sich in einzelnen Handlungsfeldern abbilden, die im Folgenden näher beleuchtet werden.

3.2.3. Handlungsfelder der kreislauforientierten Planung

Das Urban-Mining-Design umfasst die Strategie des Urban Mining als Reaktivierung von in der städtischen Umgebung angesammelten Ressourcen sowie die Ansätze des kreislauffähigen Bauens, wobei die Materialien und Fügetechniken für die Unterstützung der technischen und biologischen Kreislaufführung der eingesetzten Ressourcen konzipiert sind (*Heisel & Hebel, 2022: S. 143-145*).

Wie im vorigen Kapitel erläutert, können hierbei sowohl die Rohstoffe und Materialien als auch Flächen oder vorhandene Bausubstanz als Ressourcen betrachtet werden. Demnach erfolgt die

kreislauforientierte Planung in verschiedenen Maßstäben – den Handlungsfeldern – wobei verschiedene Ressourcengrößen und -typen im Fokus des jeweiligen Handlungsfeldes stehen. Jedes Handlungsfeld stellt einen bestimmten Planungsmaßstab dar und deckt somit einen bestimmten Aspekt des gesamtheitlichen Prozesses von der Stadt- bis hin zur Gebäudeplanung. Dabei gilt es anzumerken, dass sich die Handlungsfelder aufeinander aufbauen und sich daher in einigen Aspekten überschneiden.

Stadtplanung und Städtebau: Standort und Umfeld

Das Handlungsfeld **Standort und Umfeld** konzentriert sich auf die bevorzugte Nutzung und Umnutzung bestehender Stadtstrukturen und Gebäude anstatt des Neubaus.

Durch Maßnahmen auf der Ebene der Stadtplanung kann ein direkter und indirekter Einfluss auf die Nutzung urbaner Stoffströme und natürlicher Ressourcen und somit ein bedeutender Beitrag zur ressourcenschonenden Stadtentwicklung erzielt werden (*Verbücheln, 2021: S. 8*). Dieser Ansatz erfordert die kritische Prüfung der Notwendigkeit neuer Bauten, denn das höchste Potenzial zur Ressourcen- und Treibhausgaseinsparung liegt in der Revitalisierung des Bestandes (*Fuhrhop, 2015, zitiert in Zabek & Quaing, 2022: S. 77*). Dazu gehört die Vermeidung neuer Flächenversiegelungen und Nachverdichtung bestehender Bebauung durch Aufstockungen und Baulückenschließungen, Minimierung von Leerständen und Weiternutzung von Bestandsbauten, was insbesondere gegenüber dem Neubau auf ungenutzten Flächen bevorzugt wird (*Lechner et al., 2022: S. 6; Luger & Dorau, 2021: S. 23*). Insbesondere lassen Ansätze sowohl den Bodenverbrauch als auch den Materialaufwand für Ersatzneubau und neuen Infrastrukturen vermeiden oder reduzieren.

Darüber hinaus ermöglichen die Maßnahmen der Klimaanpassung wie Anlage von Frischluftschneisen, Entsiegelung von Verkehrsflächen und Anpflanzung klimawandelresistenter Gehölze die Einbettung ganzer Standorte in den biologischen Kreislauf der natürlichen Umwelt wie vom Cradle-to-Cradle-Konzept angestrebt wird (*Hillebrandt, 2018: S. 10; vgl. Kapitel 3.1.2*).

Städtebau: Gebäudekubatur

Der Ressourcenverbrauch eines Bauprojekts wird maßgeblich von der Größe und Form des Gebäudes bestimmt, wobei diese Faktoren sowohl auf städtebaulicher als auch auf architektonischer Ebene beeinflusst werden können (*Luger & Dorau, 2021: S. 24*).

In der Stadtplanung legen die Vorgaben des Bebauungsplans wichtige Parameter fest, darunter Gebäudehöhen entsprechend den Bauklassen, Baufluchtlinien, Bebauungsdichte, PKW-Stellplatzschlüssel sowie die Gestaltung der Freiflächen und spezifische Bebauungsbestimmungen für einzelne Grundstücke. Diese Parameter sind entscheidend für die Förderung einer ressourcenschonenden Bauweise, wodurch einerseits der Bedarf an Materialien reduziert und

andererseits deren Nutzungseffizienz erhöht werden kann (Luger & Dorau, 2021: S. 24). Beispielsweise kann das Herabsetzen des PKW-Stellplatzschlüssels den Bau von Tiefgaragen – als ressourcenintensive und schwer umnutzbare Gebäudebestandteile – vermeiden lassen und somit die Einsparungen bei Fläche und Baumaterial erzielen (Verbücheln et al., 2021: S. 40).

Durch die Erhöhung der Bebauungsdichte und der Geschoßflächenzahl kann eine effiziente Nutzung der Grundfläche erreicht werden, wodurch sowohl Bodenversiegelung als auch der Materialaufwand für Verkehrsflächen verringert werden. Darüber hinaus stellt die Minimierung des Flächenverbrauchs pro Person (insbesondere der Wohnfläche), kombiniert mit der Einplanung von Gemeinschaftsflächen und -räumen sowie Konzepte zur Mehrfachnutzung von Flächen im Sinne von Shared Spaces, eine wichtige Maßnahme zur Reduktion des Materialaufwandes dar (Hillebrandt, 2018: S. 11; Schiller et al., 2022: S. 36).

Gebäudeplanung: Gebäudestruktur

Als der langlebigste und ressourcenintensivste Gebäudebestandteil (Brand, 1994: S. 13; Fischli-Boson, 2021: S. 111) stellt das Tragwerk ein wichtiger Ansatzpunkt im Hinblick auf die effiziente Ressourcennutzung, dauerhafte Abfallvermeidung sowie Bindung der Grauen Energie dar. Die Voraussetzung ist hierbei eine flexible und nachrüstbare Gebäudestruktur, die sowohl während als auch am Ende der geplanten Nutzungsdauer an die wechselnden Nutzungsanforderungen angepasst werden kann (Luger & Dorau: S. 24-25).

Dabei ermöglichen die Leichtbaukonstruktionen wie Skelettbau die Grundrisse ohne tragende Wände und somit flexible Raumaufteilungen sowie bieten im Vergleich zum Massivbau eine ressourcenschonende Alternative durch geringeren Materialeinsatz (Hillebrandt, 2018: S. 12; Fischli-Boson, 2021: S. 111). Zudem ermöglicht die Reduktion tragender Bauteile auf Stützen und Träger die zukünftigen räumlichen Verbindungen über mehrere Geschoße hinweg durch den Einbau zusätzlicher Treppen und Galerien herzustellen, was eine Anpassung an unterschiedliche Nutzungsarten erleichtert. Die multifunktional orientierten Rohbauraumhöhen statt monofunktionaler Mindestgeschoßhöhen, die ausreichenden Traglastreserven, sowie die flexible Anordnung und Dimensionierung der Erschließungskerne (für die erhöhte Personenzahl für den Fall der Aufstockung) stellen eine weitere Unterstützung verschiedener Gebäudenutzungsszenarien dar (Hillebrandt, 2018: S. 12).

Des Weiteren hängt die Möglichkeit zur Nachnutzung eines Gebäudes wesentlich von der Flexibilität seiner Fassade ab, denn beispielsweise die Fassaden bei Gewerbe- oder Büroflächen unterscheiden sich in ihren Anforderungen und Anordnung von denen für Wohnzwecke. Die Fassade soll daher demontierbar und sortenrein trennbar konzipiert werden, um sowohl die Anpassbarkeit des

Gebäudes an die wechselnde Nutzung als auch den Austausch, die Wiederverwendung und Recycling der Fassadenelemente zu ermöglichen (*ebd.: S. 12*).

Gebäudeplanung: Fügung, Bauteile und Material

Die reversible Fügung im Sinne von lösbaren (z.B. mechanischen und steckbaren) Verbindungen und von verklebten Verbundkonstruktionen ermöglicht eine schnelle und wirtschaftliche Demontage und Austausch sowie ein effizientes Recycling der häufig zu erneuernden Elemente wie Trockenbauwände oder Boden- und Deckenbeläge. Dadurch lässt sich sowohl die funktionale Anpassung des Innenraums als auch effiziente Rückgewinnung der Sekundärrohstoffe erzielen (*Luger & Dorau: S. 28-31*).

Ein weiterer Ansatz stellt die einstoffliche Bauweise dar, wobei Tragkonstruktionen und Bauteile des Gebäudes nur aus einem bestimmten Baustoff anstatt aus mehreren Materialschichten bestehen.

Dieser Ansatz kann bauteilweise angewendet werden, da die Einstofflichkeit des gesamten Gebäudes aus bauphysikalischen Gründen nicht erreicht werden kann. Der Vorteil diese Methode liegt einerseits in einem kostengünstigen Rückbau und andererseits im sortenreinen störstofffreien Recycling (*Hillebrandt, 2018: S. 13; Binder & Riegler-Floors, 2018: S. 102-106*).

Das modulare Bausystem ermöglicht eine individuelle Konfiguration des Grundrisses innerhalb der Moduleinheit und daher für langfristige Nutzung erforderliche Flexibilität des Gebäudes (*Heisel & Hebel, 2022: S. 121-127*). Darüber hinaus, ermöglicht der modulare Aufbau einen zerstörungsfreien Rückbau der Bauelemente und spätere Wiederverwendung an einem anderen Ort, sowie Vermeidung des konstruktionsbedingten Abfalls dank der standardisierten Prozesse auf der Baustelle (*Luger & Dorau, 2021: S. 29*).

3.3. Digitale Tools für kreislaforientierte Planung

Die Implementierung der kreislaforientierten Ansätze insbesondere der Sekundärrohstoffgewinnung und des Recyclings erfordert umfassende Informationen über die Qualität, stoffliche Zusammensetzung, Recyclebarkeit, Mengen, sowie zeitliche und räumliche Verfügbarkeit der potenziellen Sekundärrohstoffe, um diese effizient in geschlossenen Kreisläufen zu führen. Die Ungewissheit über diese Parameter führt dazu, dass Unternehmen oft immer noch auf Primärrohstoffe und -materialien setzen, um die Sicherheit in Bezug auf diese Aspekte zu haben, obwohl Sekundärmaterialien potenziell kostengünstiger und umweltfreundlicher sein könnten (*Wilts & Berg, 2018: S. 4*).

Um dieses Problem zu bewältigen, ist daher eine stärkere Koordination der Stoffflüsse und Informationsflüsse erforderlich, indem nicht nur Produkte und darin enthaltene Rohstoffe, sondern

auch die Produktinformationen im Kreislauf geführt werden. Insbesondere ist es notwendig die Produktinformationen während des gesamten Produktlebenszyklus zu erhalten und zur Verfügung zu stellen, um daraus die Informationen über die Mengen und Qualitäten sowie über Verortung und Verfügbarkeit der potenziell anfallenden Sekundärrohstoffe abzuleiten. Diese Informationen sollten informierte Entscheidungen im Rahmen der Recycling- und Logistikprozesse ermöglichen und somit die Optimierung der Planung und Durchführung dieser Prozesse unterstützen. (*ebd.* S. 5).

Als „*Missing Link*“ für die Umsetzung dieses Ansatzes nennen Wilts & Berg (*ebd.*) die Digitale Transformation, insbesondere die Einrichtung verschiedener Informations- und Kommunikationstechnologien zur Dokumentation und Verwaltung relevanter Daten zur Schließung der bestehenden Informationslücken. Beim Urban Mining im Gebäudebestand lässt sich die Aufgabe solcher Technologien als Unterstützung der Urbanen Prospektion (*vgl. Kapitel 3.2.1*) durch Identifizierung, Quantifizierung und Kategorisierung der Materialien in Bauwerksbeständen betrachten.

Das vorliegende Kapitel widmet sich einer Auswahl der Tools und Technologien, die in diesem Kontext für Erhebung, Systematisierung und Aufbereitung der Urban-Mining-relevanten Daten zur Anwendung kommen können.

3.3.1. GIS und Geodaten

Geoinformationssysteme (GIS) bieten eine Infrastruktur zur Erhebung, Kombination, Verwaltung und Darstellung raumbezogener Daten, um daraus einen analytischen Mehrwert zu schaffen. Im Kontext der Urbanen Prospektion können GIS als ein „*effektives Werkzeug zur Charakterisierung und Visualisierung geografischer Verteilungen von recycelbaren Ressourcen oder Materialien in Urbanen Minen*“ (*Zhu, 2014: S. 235, eigene Übersetzung*) eingesetzt werden und somit die Schaffung einer Datengrundlage über die regionalen Materialbestände unterstützen. Daxbeck et al. (2015) bezeichnen die „*Visualisierung des anthropogenen Materiallagers*“ als „*ersten Schritt in Richtung Bewirtschaftung und Monitoring des Lagers*“ (*Daxbeck et al., 2015: S. 8*).

Das Anwendungspotenzial von GIS für die Planung der Urban Mining Prozesse ist maßgeblich von der Fähigkeit von GIS geprägt, die Daten aus verschiedenen Quellen nach Datenebenen (Data Layers) zu strukturieren, über deren Raumbezug zu verbinden und in einem gesamtheitlichen Bild kartographisch darzustellen. Wie in der Abbildung 29 dargestellt, können durch die Kombination mehrerer Grunddaten-Layer zu räumlichen Objekten wie Gebäude und Infrastrukturnetze, sowie Gegebenheiten wie Gebietsgrenzen (Base Data Layers) die neuen, Urban-Mining-spezifischen, Datenebenen (Urban Mine Layers) innerhalb der Datenbank erstellt werden.

Die erzeugten Urban-Mining-spezifischen Ebenen dienen der Abbildung von In- und Outputs der Materialflüsse, sowie von Materialbeständen und Standorten zur potenziellen Materialgewinnung.

Damit können verschiedene Zusammenhänge im Rahmen Urban Mining Prozesse ermittelt und visualisiert werden. Beispielsweise können damit die Lagerstätten mit bestimmtem Materialgehalt, z.B. 5000 kg/km², als Bereiche innerhalb eines Gebietes identifiziert und nach einer festgelegten Entfernung zu Abfallsammelstellen gegliedert werden (Zhu, 2014: S. 237).

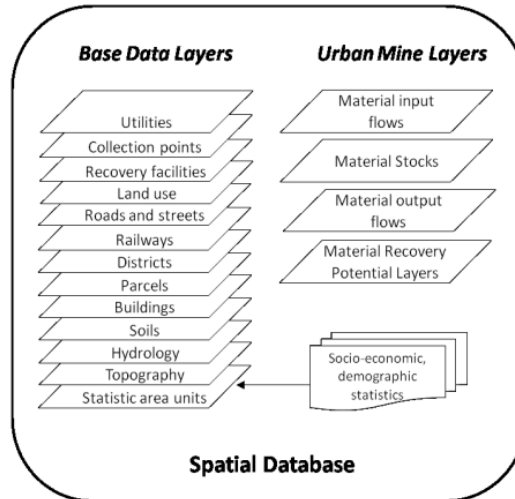


Abbildung 29: Räumliche Datenbank für die Fragestellungen des Urban Mining. Quelle: Zhu, 2014: S. 237

Die Abbildung 30 ordnet die GIS-Anwendungsfälle einem generalisierten Ablauf des Urban-Mining-Prozesses, wobei die Prozessbausteine den Weg von Identifizierung der Materiallagerstätten bis zur Herstellung von Recyclingmaterialien darstellen.

Bei der Quantifizierung („quantification of stocks“) und Lokalisierung („localisation of stocks“) der Materialbestände können GIS für die Materialbestands- und Materialflussanalyse, sowie für Materialbuchhaltung angewendet werden. Damit können die Aufschlüsse über das Volumen, über die räumliche Verteilung der Materialien und Dynamik des Materiallagers geliefert, sowie darauf aufbauend ein System zur Verwaltung dieser Daten entwickelt werden (Zhu, 2014: S. 239-243).

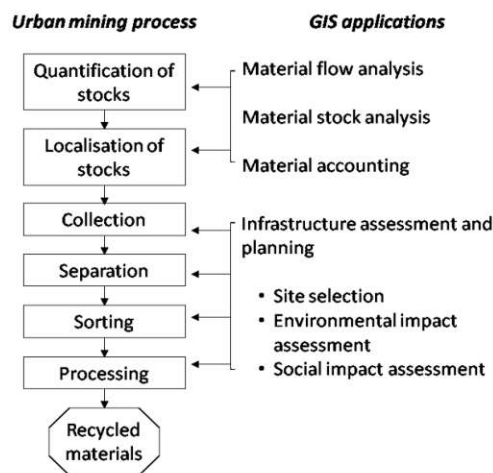


Abbildung 30: GIS-Anwendungsfälle im Urban Mining. Quelle: Zhu, 2014: S. 239

Des Weiteren können GIS für die Bewertung und Planung der Infrastruktur zur Sammlung, Trennung, Sortierung und Aufbereitung der Materialien verwendet werden. Insbesondere können

durch die Kombination der Daten zur bestehenden Sammlungs- und Aufbereitungsinfrastruktur sowie zur räumlichen Verteilung von Materialbeständen verschiedene Analysen, wie Proximitätsanalyse, Netzwerkanalyse oder Identifikation von optimalen Standorten, durchgeführt werden. Damit kann die Nutzung der bestehenden Infrastruktur beurteilt, sowie Bedarfe für neue Infrastrukturen identifiziert werden. Ein wesentlicher Faktor für die Effizienz des Recyclings ist die Distanz bzw. die Transportkosten zwischen Materiallagerstätten, Sammelstellen und Aufbereitungsanlagen. Die analysegestützte Planung der Recyclinginfrastruktur ermöglicht die Optimierung der Logistik und somit die Effizienz des Recyclings. Darüber hinaus können mittels GIS die umweltbezogenen, sozialen und ökonomischen Auswirkungen der Infrastruktur bewertet werden, um potenzielle negative Effekte wie z.B. Schadstoffausstoße in der Nähe von Siedlungen zu minimieren (Zhu, 2014: S. 243-244).

Eine wesentliche Herausforderung bei der Anwendung von Geoinformationen ist die Kombination der Daten aus verschiedenen Quellen, insbesondere die korrekte Verknüpfung von Attributdaten und Geometrien (Bindreiter et al., 2022: S. 30-31). Die Lösung ist hierbei eine zentrale Harmonisierung der Datensätze, die anhand verbindlicher Spezifikationen und auf einer regionalen und internationalen Ebene erfolgen muss, um die effiziente Nutzung fachgebietsübergreifender Daten zu ermöglichen (Schnitzer, 2021: S. 20, S. 160).

3.3.2. Building Information Modelling

Der Begriff BIM umfasst in seiner Definition sowohl den Prozess einer „Building Information Modeling“ als auch das daraus resultierende „Building Information Model“.

Ein Building Information Model ist ein dreidimensionales digitales Bauwerksmodell, „das die Informationen in Form von Geometrien und Alphanumerik (nicht-geometrische Informationen zur Funktion, Verortung, Material etc.) enthält“ (Eichler et al., 2024: S. 32). Dementsprechend bezeichnet das Building Information Modelling den „Vorgang zur Erschaffung, Änderung und Verwaltung eines solchen digitalen Bauwerkmodells mithilfe entsprechender Softwarewerkzeuge“ (Borrmann, 2015: S. 4). Das Ziel des BIM-Prozesses ist die Integration aller im Gebäudeplanungs- und Bauprozess beteiligten Fachdisziplinen in einer integrierten Datenumgebung zu vereinen (Wilhelm et al., 2021: S. 332), um ein umfassendes Informationsmodell des Gebäudes, einen digitalen Zwilling mit allen relevanten Gebäudedaten, zu erstellen. Wie in der Abbildung 31 dargestellt, unterstützt das digitale Modell verschiedene Aufgaben in den Phasen der Planung, der Ausführung, der Bewirtschaftung sowie des Rückbaus und wird somit über den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes aktualisiert und verwendet (Borrmann, 2015: S. 4).

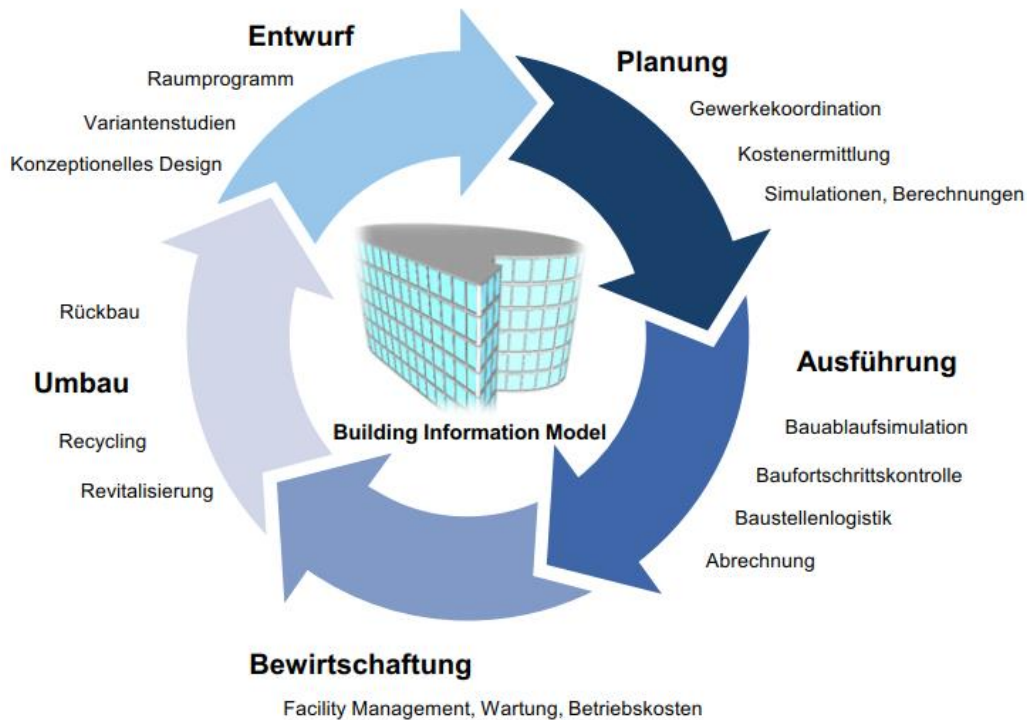


Abbildung 31: BIM Anwendungen im Gebäudelebenszyklus. Quelle: Borrmann et al., 2015: S. 4

In diesem Zusammenhang lässt sich ein BIM-Modell als eine Lösung zur durchgängigen Dokumentation und Bereitstellung der Gebäudeinformationen und somit als eine detailreiche Quelle der für Urban Mining relevanten Daten, wie insbesondere zur materiellen Zusammensetzung der Gebäude, betrachten.

Als integrierte Planungsmethode weist BIM verschiedene Entwicklungsstufen auf (Abbildung 32). Hierbei wird projektdisziplinbezogen zwischen **little BIM** und **BIG BIM** sowie softwarebezogen zwischen **closedBIM** und **openBIM** unterschieden.

Das **little BIM** bezeichnet den Einsatz von BIM nur in vereinzelten Fachdisziplinen des Projektes. Die BIM-gestützten Projektteile stellen dabei an sich geschlossene Insellösungen dar. Das **BIG BIM** hingegen bedeutet die Anwendung von BIM-Methode in allen Fachdisziplinen des Projektes (Eichler et al., 2024: S. 64-66).

Im **closedBIM** wird für die Erstellung und Nutzung eines Gebäudemodells nur eine bestimmte Software bzw. Softwarefamilie verwendet. Dabei erstellen die Fachplaner:innen gemeinsam ein zentrales, in der Regel an einem BIM-Server gespeichertes Modell. Das **openBIM** stellt eine offene Lösung dar, die es ermöglicht, die Modelle der Projektdisziplinen (Fachmodelle) über verschiedene BIM-fähige Produkte auszutauschen und daraus ein Gesamtmodell aus mehreren Fachmodellen zusammenzuführen (Eichler et al., 2024: S. 64-66). Diese Methode erlaubt den Projektteams unabhängig der von ihnen verwendeten CAD-Programme an der Erstellung von Modellen

mitzuwirken und in einem kollaborativen offenen Workflow zusammenzuarbeiten (Schrantz et al., 2021: S. 20).

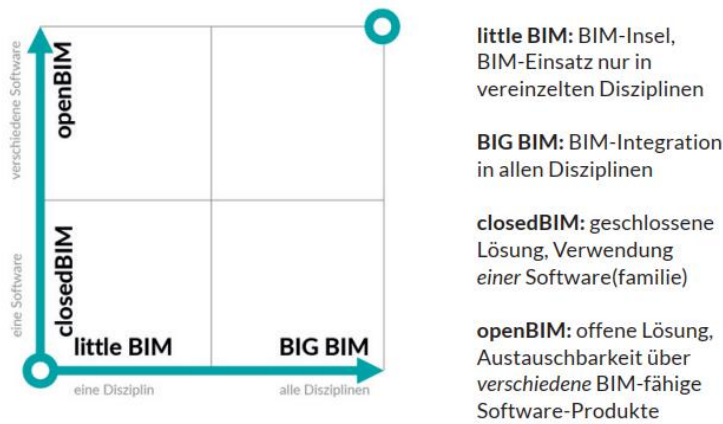


Abbildung 32: Entwicklungsstufen von BIM. Quelle: Eichler et al., 2024: S. 64

BIM-Fachmodelle können in verschiedenen CAD-Programmen wie ArchiCAD, Revit, Allplan, Vectorworks u.a. erstellt werden. Als Austauschformat im openBIM fungiert das von buildingSMART³ International entwickelte Dateiformat IFC (Industry Foundation Classes), das aus verschiedenen Klassen mit Attributen besteht und damit Bauwerke semantisch beschreiben kann (Eichler et al., 2024: S. 47). Das IFC-Format ist mittels einer internationalen Norm, der ISO 16739, gesichert und stellt einen langfristigen, international etablierten Standard dar, wodurch eine dauerhafte Verfügbarkeit von Bauwerksinformationen gewährleistet wird (Schrantz et al., 2021: S. 20). Die Abbildung von Bauwerken im IFC-Format erfolgt durch Elemente wie z.B. Wände, Decken, Stützen, Türen oder Fenster. Die Elemente werden im Gebäude durch Verknüpfung an Geschosse verortet sowie mit Merkmalen, unter anderem mit Material- und Baustoffinformationen bzw. mit materialbezogenen Eigenschaften, befüllt (Eichler et al., 2024: S. 47). Das IFC-Format ermöglicht den Datenaustausch sowohl zwischen CAD-Programmen als auch zwischen CAD-Programmen und anderer Software. Beispielsweise können IFC-Modelle als Feature-Datasets in ArcGIS (ESRI, 2024) oder als Grundlage für die modellbasierte Ökobilanzierung verwendet werden (buildingSMART, 2024).

³ buildingSMART (<https://www.buildingsmart.org/>) ist eine internationale Organisation, die sich mit der Entwicklung von Standards für die digitale Transformation der Bauindustrie durch Building Information Modeling (BIM) beschäftigt

In diesem Zusammenhang können folgende Aspekte der BIM-Technologie hervorgehoben werden:

- Anhand des BIM-Modells können umfassende Bauwerksdaten inklusive Informationen zu verwendeten Baumaterialien dokumentiert und über den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes aktuell gehalten werden
- Das offene Dateiformat IFC ermöglicht einen effizienten Austausch der Gebäudedaten mit verschiedenen digitalen Tools, sowie die langfristige Verfügbarkeit dieser Daten

Der Informationsgehalt von BIM-Modellen hinsichtlich Material- und Stoffmengen, vorausgesetzt die Daten sind detailliert und aktuell, stellt ein wesentliches Instrument der kreislauforientierten Planung dar (*Schranz et al., 2021: S. 134-140*). Insbesondere können die Daten über die Materialität, über den Schad- und Störstoffgehalt sowie über die Verortung der Bauteile im Bauwerk die Erstellung von Rückbaukonzepten, die Schad- und Störstofferkundung, sowie die sortenreine Trennung der Materialien unterstützen (*ebd.*). Dies erlaubt eine genaue Zuordnung der Bauteile zu den bestimmten Prozessen des Rückbaus, wodurch die Koordination der Rückführungslogistik verbessert und somit die Effizienz der Verwertung erhöht werden kann (*van den Berg et al., 2021: S. 328-334*).

Darüber hinaus können BIM-Modelle im IFC-Format als Datenquelle für weitere digitale Instrumente der kreislauforientierten Planung und des Urban Mining dienen. Dabei kommen insbesondere materielle Gebäudepässe sowie Materialkataster als Tools zur Erfassung und Systematisierung der materialbezogenen Bauwerksdaten in Frage. Der Datenaustausch zwischen BIM und diesen Tools wird in den darauffolgenden Kapiteln näher beleuchtet.

3.3.3. Materieller Gebäudepass

Der materielle Gebäudepass (MGP), auch bekannt als Materialpass (*Müller et al., 2017*), Materialinventar (*Schiller et al., 2022*), Gebäudepass (*Reisinger et al., 2014*) oder Gebäuderessourcenpass (*DGNB, o.J.*) ist ein digitales Dokument für ein Gebäude, das „*die Informationen über den Einbauort, die Nutzungsdauer, mögliche Verwertungs- und Entsorgungswege, Schadstoff- und Risikokennzeichnungen, Produktdatenblätter der verbauten Materialien und Wartungshinweise*“ enthält (*Luger & Rauh, 2020: S. 43*).

Das Ziel eines materiellen Gebäudepasses ist „*die strukturierte Erfassung der beim Bau eingesetzten Produkte und Materialien*“ (*Schiller et al., 2022; S. 82*), insbesondere deren Eigenschaften, die für Recycling und Wiederverwendung relevant sind (*Mulhall et al., 2017: S. 17*).

Der materielle Gebäudepass wird durch Planer, Gutachter bzw. Ingenieure erstellt und dem Gebäudeeigentümer sowie den Dritten übergeben, die darin enthaltene Informationen benötigen

(Reisinger et al., 2014: S. 9; Schiller et al., 2022: S. 81). Er stellt eine dynamische lebenszyklusbegleitende Objektdokumentation dar, die im Laufe des Gebäudelebenszyklus verfügbar gehalten und aktualisiert werden muss (Schiller et al., 2022: S. 81), um ihre Relevanz und Genauigkeit über den gesamten Lebenszyklus des Objekts hinweg zu gewährleisten.

Aktuell existieren verschiedene Varianten der materiellen Gebäudepässe bzw. Tools, die Bauwerksinformationen auswerten, strukturieren und als ein Dokument, der Gebäudepass, exportieren können.

Einige relevante Beispiele aus der Praxis und Forschung sind die Pässe und Tools von DGNB⁴ (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen), Madaster⁵, Concular⁶ sowie der materielle Gebäudepass der TU Wien (Gebetsroither et al., 2024: S. 40).

Der DGNB-Gebäudepass wurde als eine offene und an die anderen Tools anschlussfähige Vorlage entwickelt, die einen Vorschlag der DGNB zur Definition und Strukturierung der für einen Gebäudepass relevanten Informationen darstellt (DGNB, o.J.).

Eine Gemeinsamkeit der Gebäudepass-Tools ist „die Nutzung digitaler Technologien und die Möglichkeit BIM-Modelle als Datengrundlage für die Ermittlung der strukturierten Ausgangsinformationen zu erhalten“ (Gebetsroither et al., 2024: S. 42). Des Weiteren können alle vier Tools auf Basis der eingegebenen Daten verschiedene Aspekte, die mit Materialverbrauch in Verbindung stehen, wie CO₂-Emissionen, Trennbarkeit der unterschiedlichen Materialschichten oder das Recyceln/Verwerten der Materialien, bilanzieren (ebd.).

Für die Erstellung eines korrekten materiellen Gebäudepasses ist eine komplexe Datenbasis notwendig. Kovacic et al. (2019: S. 11) beschreiben die Methode zur Erstellung des materiellen Gebäudepasses (MGP der TU Wien) als „Kopplung mehrerer digitaler Werkzeuge und Datenbanken“ (Abbildung 33). Als Datengrundlage werden hierbei die BIM-Modelle verwendet, die anhand eines Modellierungsleitfadens erstellt werden, um die erforderliche hohe Modellierungsqualität zu gewährleisten. Die Auswertung der Modelle erfolgt anhand eines Analysewerkzeugs, das die Mengen, Massen und Eigenschaften der Bauteile ablesen kann. Die LCA-Daten der Baustoffe werden aus verschiedenen Datenbanken herangezogen und den Bauteilen des Modells zugeordnet. Aus diesem zusammengeführten Datensatz entsteht der materielle Gebäudepass mit den systematisierten Angaben zu verbauten Materialien und Mengen, sowie mit den Bewertungen der Umweltauswirkungen.

⁴ <https://www.dgnb.de/de/nachhaltiges-bauen/zirkulaeres-bauen/gebaeuderessourcenpass>

⁵ <https://madaster.ch/neuigkeiten/madaster-materialpass-als-instrument-fuer-eine-zirkulaere-bau-und-immobilienwirtschaft/>

⁶ <https://concular.de/digitaler-gebaeuderessourcenpass/>

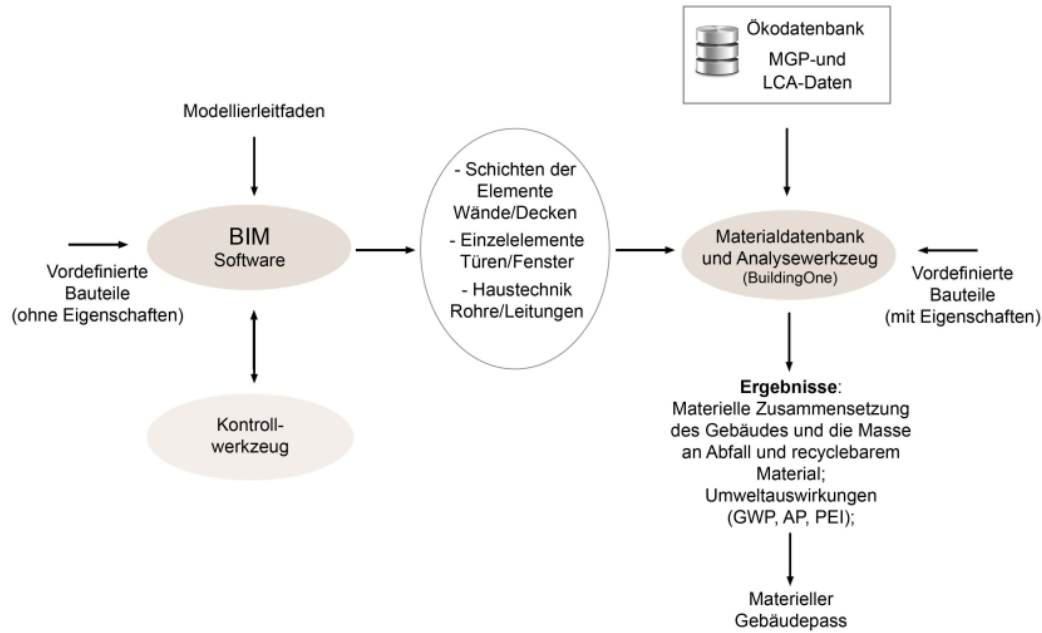


Abbildung 33: Methode für die Erstellung des materiellen Gebäudepasses. Quelle: Kovacic et al., 2019, S. 21

Die Plattformen Concular und Madaster verfolgen eine ähnliche semi-automatisierte Methode: Hierbei können BIM-Modelle im IFC-Format über eine webbasierte Benutzeroberfläche eingelesen und mithilfe von integrierten Analysetools und LCA-Daten aus den Datenbanken ausgewertet werden (Gebetsroither et al., 2024: S. 39-44).

Die Abbildung 34 zeigt die Struktur und Inhalte des materiellen Gebäudepasses am Beispiel des DGNB-Gebäudepasses für ein Bestandsgebäude in der vollständigen Fassung.

Der Gebäudepass ist in vier Informationsblöcke gegliedert, die Aufschlüsse über die allgemeinen Bauwerksdaten (**Allgemeines / Bauwerk**), die materielle Zusammensetzung (**Heutiger Beitrag zur Kreislaufwirtschaft und Künftige Kreislauffähigkeit**) sowie über die Flexibilität der Gebäudestruktur (**Nutzung**) liefern. Die materielle Zusammensetzung des Gebäudes wird in nach Materialgruppen und Materialherkunft sowie nach bei der Baumaßnahme anfallenden Bau- und Abbruchabfällen und deren Verwertungs- oder Entsorgungswege aufgeschlüsselt. Die relevanten Materialmengen werden in Prozent an der Gesamtmaterialmasse des Gebäudes angegeben. Der DGNB-Pass umfasst zudem sowohl quantitative -wie die Umweltwirkungen, den monetären (Rest-)Wert und die potenzielle Kreislauffähigkeit der Materialien nach geplanten Nachnutzungswegen, als auch qualitative Bewertungen – wie die Demontagefähigkeit und werkstoffliche Trennbarkeit des Gebäudes.

Als umfassender Datensatz der materialitätsbezogenen Bauwerksinformationen kann ein Materieller Gebäudepass als ein Baustein für die Erfassung des kompletten Gebäudebestandes betrachtet werden. Insbesondere können die MGP-Daten der Bauwerke mittels GIS in einer Stadt

verortet und dadurch als Grundlage bzw. Dateninput für ein Sekundärrohstoffkataster des gesamtstädtischen Gebäudebestandes verwendet werden (Kovacic et al., 2019: S. 12).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der materielle Gebäudepass mehrere Funktionen im Planungskontext erfüllen kann: *„es ist ein Planungs- und Optimierungswerkzeug in Hinblick auf den effizienten Materialeinsatz und späteren Rückbau, eine Dokumentation der notwendigen materiellen Information für das Recycling von Bauwerken am Lebensende und dient als Grundlage für einen urbanen Rohstoffkataster auf Stadt-Ebene“* (Kovacic et al., 2019: S. 10).



GEBÄUDERESSOURCENPASS

VOLLSTÄNDIGE FASSUNG

PROJEKT	Projektbezeichnung	PASS-ID	UUID/GUID	DQ		
DATUM / NAME	Erstausstellung / Name / Kontaktdaten	VERSION	-001	44927		
(0-3)						
Allgemeines / Bauwerk	i Gebäudeinformationen und Gebäudemassen 1,9					
	0	Projekt-Zertifizierung	Ja (DGNB (Gold))	9	Gesamtmasse des Gebäudes [t]	1234,56
	1	Standort	Adresse / GIS / Flurstück	10 / 11	BGF [m²] / NRF [m²]	567 / 456
	2	Baujahr (Fertigstellung)	2022	12	Flächengewichtete Masse [t/m²NRF]	2,3
	3	Baugenehmigung	1.1.2020	14	Umfang dokumentierter Massen [%]	99
	4	Bauweise	Holz-Stahlbeton-Hybridbau	15	Nutzeinheit	Bewohner [BE]
	5	Typ / Anlass	Bestandserhalt >50% (Umbau)	16	Datenebene / Datenbasis	Bauteil: Digitales Modell/Datenbank
	6	Kategorie	Büro- / Verwaltungsgebäude	17	Bauteil-Einbauort zuordenbar	nein
	7	Beschreibung	Keller (teilunterkellert)	18	Bauteilbezog. Auswertung möglich	ja, Bauteilkatalog
8	Systemgrenze (KG)	KG300, KG400, KG500	19	Restnutzungsdauer [a]	50	
Heutiger Beitrag zur Kreislaufwirtschaft	Materialität, Materialherkunft, Materialverträglichkeit und Bau- und Abbruchabfälle 1,7					
	20 Materialität des Bauwerks [Masse-%] Holz und Holzwerkstoffe: 17 Kunststoffe: 4 Bituminöse Mischungen: 1 Materialmix: 3 Elektrik und Elektronik: 3 Metalle: 8 Gips: 2 Glas: 3 Mineralische Baustoffe: 58		29 Materialherkunft - Umgesetzte Kreislaufführung [Masse-%] Vermeidung (nicht in Massenbilanz): 5 Wiederverwendet: 57 Weiterverwendet: 5 Wiederverwert (Recycling) (Weiter-)verwert (Recycling): 5 Primärrohstoffe, erneuerbar **: 11 Primärrohstoffe, nicht erneuerbar: 9 Vermiedene Primärrohstoffe [t]*: 123,4 (**darin: verantwortungsvoll erwirtschafteter nachwachsender Rohstoffanteil [Masse-%]*): (10)			
	21 Monetärer Materialwert [€]* 1.000.000 22 (Bezugsdatum Materialwert*) (01.01.2023) 23 (Verfahren Materialwert-Erhobung*) (Angabe Verfahren, Beschreibung Methode)		30 Bau- und Abbruchabfälle (der betrachteten Baumaßnahme) (nicht gefährliche Bau- und Abbruchabfälle) [Massen-%] Wiederverwendung (und Vorbereitung): 5 Werkstoff. Qualitative Wiederverwertung: 15 Stoffliche Weiterverwertung: 70 Thermische Verwertung: 4 Verfüllung: 3 Deponierung: 2 Entsorgung als gefährlicher Abfall: 1 33 Gesamtmasse Bau- / Abbruchabfälle [t] 1234,5 34 (davon in Baumaßnahme eingesetzt [t]*) (123,40) 35 Umgesetzte Rückbaumaßnahmen* ja, selektiv, mit Audit			
	24 Schad- und Risikostoffe Einstufung des Bauwerks QS2 (gemäß DGNB Kriterium ENV1.2) (Verfahren der Einstufung) 25 (Erläuterung zur Einstufung) Kreislauffähigkeit nicht hindernd, Standard nicht zu erwarten 26 Schadstoff-Eintrag aus Nutzung vorhanden (01.02.2022) 27 Schadstoffgutachten Bestand optimiert (Analyse und Schadstoff-Sanierung (inkl. Risiko-/Störstoffen) wurde durchgeführt, Rest-Schadstoffkataster ist dokumentiert)					
	f Umweltwirkungen über den Lebenszyklus 2,7					
	Lebenszyklusphasen/-szenarien laut DIN EN 15978 [Module] : Herstellung [A1-A3] Nutzung / Ersatz [B4] Energie im Betrieb [B6.1, B6.2, B6.3] Entsorgung / Abfälle [C3, C4] 'Recyclingpotenzial' [D1] Effekte export. Energie [D2] = Gesamtwert bauwerkbezogen:					
	38 THG-Emissionen: 11,00 1,00 20,00 2,00 -1,00 0,00 [kgCO _{2e} /m²NRF*a] =33,00 40 Primärenergiebedarf (PE _{ne}) ¹ : 8,00 1,00 21,00 1,00 -1,00 0,00 [kWh/m²NRF*a] =30,00 ¹ PE _{ne} =PE nicht erneuerbar; optional: anderer Energie-/Ressourcenindikator		43 Angewandtes Ökobilanz-Verfahren: gemäß QNG-Regeln			
	Nutzung	Flexibilität und Anpassungsfähigkeit der Gebäudestruktur 1,4				
		46 Mehrfachnutzung Flächen* 50 [%-Anteil MF-G2/BGF] 47 Umnutzungsfähigkeit* 50 [%-Anteil der NRF] 48 Flächenteilung umsetzbar* Teilweise, Konzept vorhanden 54 Detaillierte Beschreibung zur Vorgehensweise bei Umsetzung des Umnutzungs-, Umbau- bzw. Erweiterungskonzepts vorhanden		49 Flächennutzungsgrad* 50 [%-Anteil MF-G/BGF] 52 Flächenbedarf je Nutzeinheit* 25 [m²/NE] 53 Erweiterbarkeit der Gebäudestruktur* Teilweise, Konzept vorhanden		
		Künftige Kreislauffähigkeit 1,6				
56 Demontagefähigkeit Qualitative Einstufung Bauwerk nicht demontierbar Qualitative Einstufung nach Tragwerk Hülle Ausbau TGA Außenanl. Strukturerebene / Bauwerkschicht: Nein/tlw. Nein/tlw. Nein/tlw. Nein/tlw. Nein/tlw. 58 (Verfahren zur Ermittlung) (Verfahren, ggfs. Beschreibung) 57 Demontierbare Masse* 69 [Masse-%] (des Bauwerks)		63 Materialverwertung - Potenzielle Kreislauffähigkeit (Nachnutzungswege) (nach aktuellem Stand der Technik) [Masse-%] Wiederverwendung (Vorbereitung): 10 Werkstoff. Qualitative Wiederverwertung: 8 Stoffliche Weiterverwertung: 52 Thermische Verwertung: 17 Verfüllung: 10 Deponierung: 3 Entsorgung als gefährlicher Abfall: 0				
60 Werkstoffliche Trennbarkeit Qualitative Einstufung Gebäud. überwiegend werkstofflich trennbar Qualitative Einstufung nach Tragwerk Hülle Ausbau TGA Außenanl. Strukturerebene / Bauwerkschicht: Ja Ja Nein/tlw. Nein/tlw. Nein/tlw. Nein/tlw. 63 (Verfahren zur Ermittlung) (Verfahren, ggfs. Beschreibung) 62 Trennbare Masse* 79 [Masse-%] (des Bauwerks)		68 Monetärer Restwert der Materialität [€]* 2.500.000 (Bezugsdatum Materialwert*) (01.01.2023) (Verfahren zur Materialwert-Erhobung*) (Angabe Verfahren, Beschreibung Methode) 69 Aggregierte Bewertung und Zirkularitäts-Index*(heutiger + zukünftiger Beitrag) Zirkularitäts-Index oder Bewertung: 0,0 Index 2: (Heute) 0,00 71 Methode: DGNB ZI [WERT] Index 3: (Zukunft) 0,00				
Dokumentation 2,1						
72 Digitale Dokumentation und Schnittstellen: vollständig / nicht vollständig, offene Schnittstelle (ifc/cvs) etc. 73 Datenbank und/oder Datengrundlage: vorhanden/nicht vorhanden; Angabe Datenbank, Anbieter, Software 74 Techn. Informationen aller nutzungsrelevanten Bauteile vorhanden: ja/nein; EPD, Datenblätter, Herstellerdeklaration, etc. 76 Regelm. Aktualisierung nach Umbau/Änderung/Austausch: Ja / Nein (Aktualisierungszyklus) 77 Geplante nächste Aktualisierung: 01.01.2024 (jährliche Bestätigung der Aktualität)						

Version 1.1 / September 2023 / Copyright: DGNB * = „Kann-Information“ Zusatz-Hinweis. Zahlenwerte in Ring-Grafiken sind Summen hoher Klassen

Abbildung 34: Gebäuderessourcenpass der DGNB für ein Bestandsgebäude in der vollständigen Fassung. Quelle: DGNB, 2024

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar. The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



3.3.4. Materialkataster: Der Eckpfeiler des Urban Mining

Die Materialkataster (*Schiller et al. 2022*), auch bezeichnet als Ressourcenkataster (*Brunner & Kral, 2013*), (Sekundär-)Rohstoffkataster (*Kovacic et al., 2019*), Urban Mining Plattform (*Honic et al., 2023*) oder Urban Mining Kataster (*Daxbeck, 2015; Schnitzer, 2021*), sind Informationssysteme zur Identifizierung, Quantifizierung, Bewertung und Visualisierung der Materialbeständen in anthropogenen Lagerstätten sowie zur Abbildung deren zeitliche Veränderung in bestimmten Regionen zum Zwecke der optimalen Ressourcennutzung (*Schnitzer, 2021: S. 61; Schiller et al., 2022: S. 25; Daxbeck et al., 2015: S. 3*).

Anthropogene Lagerstätten umfassen eine Vielzahl von Infrastrukturen wie Bauwerke, Straßen- und Schienennetze, Medienleitungen, Ver- und Entsorgungsnetze. Dazu kommen langlebige Konsumgüter, Industrieprozesse und weitere Elemente wie Deponien oder Tunnelausbrüche (*Daxbeck, 2015: S. 5*). Der städtische Gebäudebestand stellt daher lediglich einen Teil des gesamten Materiallagers dar.

Die Ressourcenschonung im Umgang mit städtischen Gebäudebeständen hängt im Wesentlichen von verschiedenen Entscheidungsträger:innen ab, die durch ihr Handeln den Einfluss auf Materialströme und den Materialeinsatz in Bauwerken nehmen können. Das Ziel des Materialkatasters in diesem Kontext ist die Schaffung einer Informationsgrundlage, um die Entscheidungen relevanter Akteure „hin zu einer rohstoffschonenden und kreislauforientierten Bewirtschaftung von Gebäuden und Bauwerksbeständen zu unterstützen“ (*Schiller et al., 2022: S. 21*).

Die Erfassung der Materialien im Gebäudebestand kann anhand zwei Ansätze erfolgen: (1) Materialinventare für einzelne Bauwerke und (2) regionale Materialkataster für zusammenhängende Bauwerksbestände (*Schiller et al, 2022: S. 28, S. 256-257*).

Schiller et al. (2022) definieren Materialinventare als bauwerksspezifische Datensätze, die Informationen zu Arten und Mengen der in einzelnen Bauwerken verbauten Materialien, Bauteile und haustechnischen Systeme darstellen. Ergänzend können in diesen Datensätzen der Einbauort, die Einbausituation wie Art der Verbindung einschließlich Anordnung von Bauteilschichten und Möglichkeit der Trennbarkeit, sowie Bauprodukt Daten angegeben werden (*Schiller et al., 2022: S. 82*). Materialinventare können auf Basis von Daten aus der Gebäudeplanung und -ausführung erstellt werden, einschließlich Informationen aus Bauwerksbüchern, Daten der Ökobilanzierung, der Dokumentation der Bauleitung sowie auf Basis von BIM-Modellen der Bauwerke (*ebd.: S. 29, S. 153*). Das Materialinventar kann in Tabellenform organisiert werden, wobei die Materialien nach ihrer Art und Anwendung im Bauwerk kategorisiert sind. Dies bietet nicht nur einen Überblick über die verwendeten Baustoffe, sondern auch ermöglicht die Rückverfolgung der Baustoffe zu eingesetzten

Rohstoffen sowie deren Verknüpfung mit Abfallschlüsseln, um die möglichen Verwertungswege am Ende des Gebäudelebenszyklus zu verstehen.

Neben den materialbezogenen Angaben kann das Materialinventar auch die Daten zur geplanten Lebensdauer einzelner Bauteile oder Bauteilschichten beinhalten, wodurch es möglich wird, die Mengen und Zeitpunkte des Auftretens der Materialflüsse des Gebäudes zu ermitteln. Beispielsweise den voraussichtlichen Materialabgang als Entsorgung eines ausgedienten Bauteils am Ende dessen Nutzungszyklus und den Materialeingang durch Einbau eines neuen Bauteils. Aus den Angaben zu den Verbindungstypen und der Trennbarkeit der Bauteile können Rückschlüsse auf die Recyclingfähigkeit der Materialien gezogen werden (*ebd.*: S. 124-136).

Darüber hinaus stellt das Materialinventar eine Basis für die Ökobilanzierung darstellen, wobei die mögliche Umweltwirkung der Materialität des Gebäudes bewertet wird (*ebd.*: S. 169)

Ein Materialinventar kann daher nicht nur als Dokumentation des Ist-Zustandes, sondern auch als fortschreibbarer Datensatz fungieren, der die Veränderungen des Gebäudes entlang des Lebenszyklus erfasst (*ebd.*: S. 82). In diesem Zusammenhang kann das Materialinventar als eine Basis mit materialbezogenen Daten für die Erstellung eines Gebäudepasses betrachtet werden.

Während Materialinventare die Materialströme im Lebenszyklus des „Stofflagers Bauwerk“ abbilden, beziehen sich regionale Materialkataster auf die zusammenhängenden Bauwerksbeständen, „*innerhalb derer bei den erfassten Gebäuden alle Phasen des Lebenszyklus zeitgleich auftreten können*“ (Schiller et al., 2022: S. 21-24, S: 172).

Es lassen sich zwei wesentliche Funktionen eines regionalen Materialkatasters definieren: (1) Die Dokumentation der aktuellen materiellen Zusammensetzung des Gebäudebestandes beispielsweise in einer Stadt und (2) die Prognose dessen Dynamik unter Einfluss von Bautätigkeiten wie Neubau, Abriss oder Sanierungen (Schiller et al., 2022; Bindreiter et al., 2022).

Der grundlegende Schritt für die Erstellung eines Materialkatasters ist die Entwicklung einer „*Systematik zur Identifizierung, Kategorisierung, Bewertung und Quantifizierung der relevanten anthropogenen Lager in Regionen*“, um den aktuellen Zustand des Materiallagers im Gebäudebestand zu erfassen (Daxbeck et al., 2015: S. 3). Dieser Schritt erfolgt anhand der sogenannten Bottom-Up Methode. „*Diese folgt dem Prinzip: spezifische Materialmenge eines Bauwerkstyps * Menge der Bauwerkstypen innerhalb des Betrachtungsraumes = Materialmenge innerhalb eines Betrachtungsraumes*“ (Schiller et al., 2022: S. 183). Im Rahmen dieser Methode wird zunächst die Typologisierung bestehender Bauwerke anhand verschiedener Kriterien wie Nutzung, Baualter, Bauweise, urbaner Formtyp, Größe etc. durchgeführt (*ebd.*). Die Abbildung 35 zeigt eine mögliche Systematik von Kriterien zur Typologisierung von Bauwerken.

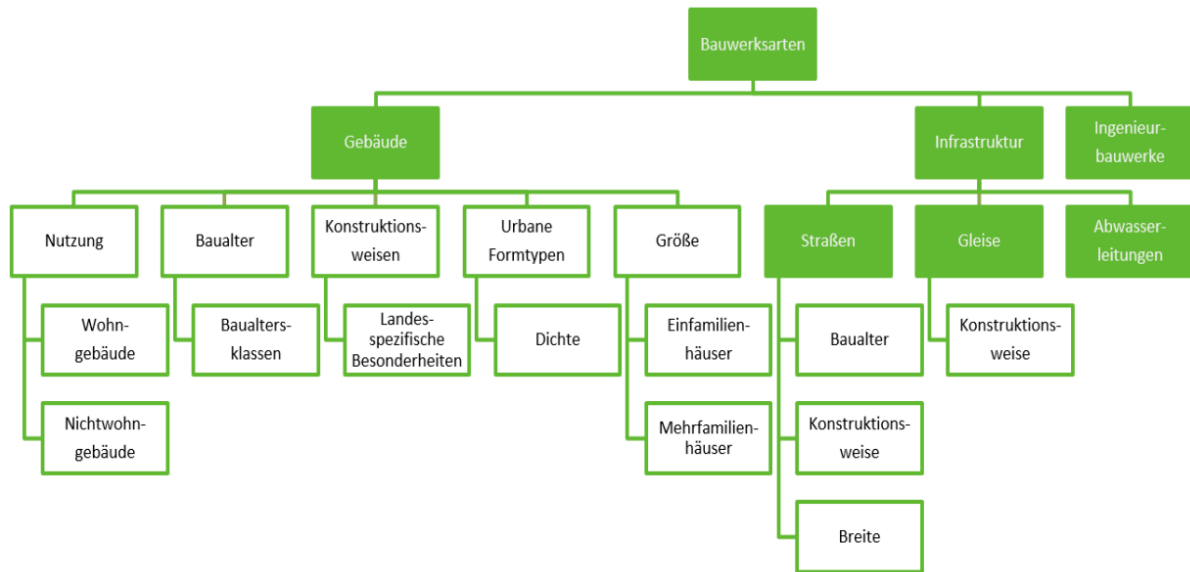


Abbildung 35: Kriterien zur Typologisierung von Bauwerken. Quelle: Schiller et al., 2022: S. 184

Anschließend werden für die definierten Typen die Mengen und Arten der darin verbauten Materialien ermittelt. Die Methoden reichen dabei von Auswertung von Plan- und Fotodokumentationen (Lederer et al., 2021) bis hin zu invasiven und hochtechnologischen nicht-invasiven Vor-Ort-Untersuchungen (Honic et al., 2023) der als Vertreter des jeweiligen Gebäudetyps definierten Bauwerke. Die genauere Beschreibung dieser Methoden findet sich im Kapitel 4.3.2.

Die erhobenen Materialien werden nach Gruppen wie beispielsweise Beton, Ziegel, Dämmung, Holz, Eisen, Stahl, Kupfer etc. gegliedert. Die Systematiken zur Materialgruppierungen hängen hierbei von spezifischen Anforderungen hinsichtlich des Detailgrades des jeweiligen Materialkatasters ab. Die Materialmengen in Typvertretern werden nach Gewicht (in Kilogramm oder Tonnen) pro Volumeneinheit des umbauten Raums ermittelt. Anhand GIS-Software werden die ermittelten Materialintensitäten mit dem aus Geodaten ermittelten Volumen der Bauwerke des jeweiligen Typs verknüpft und somit auf den gesamten regionalen Bauwerksbestand hochskaliert (Daxbeck et al., 2015; Lederer et al., 2021; Honic et al., 2023).

Die Visualisierung erfolgt dabei in einer GIS-Umgebung, wobei je nach den grundlegenden Geodaten die 2D-Karten oder 3D-Stadtmodelle in Frage kommen. Die Abbildung 36 und Abbildung 37 zeigen die Visualisierung der Materialpotenziale im Testgebiet Graz Eggenberg auf Basis des 3D-Stadtmodells aus Vermessungsdaten der Stadt Graz. Die Gebäudevolumina werden transparent dargestellt und die verbauten Materialmengen füllen das Bauwerk entsprechend ihrer spezifischen Dichte aus, wobei jedes Material in einer eigenen Farbe dargestellt wird (Daxbeck et al., 2015: S. 132).



Abbildung 36: Darstellung des Materialkasters UMKAT auf Basis des 3D-Stadtmodells. Quelle: Daxbeck et al., 2015: S. 133

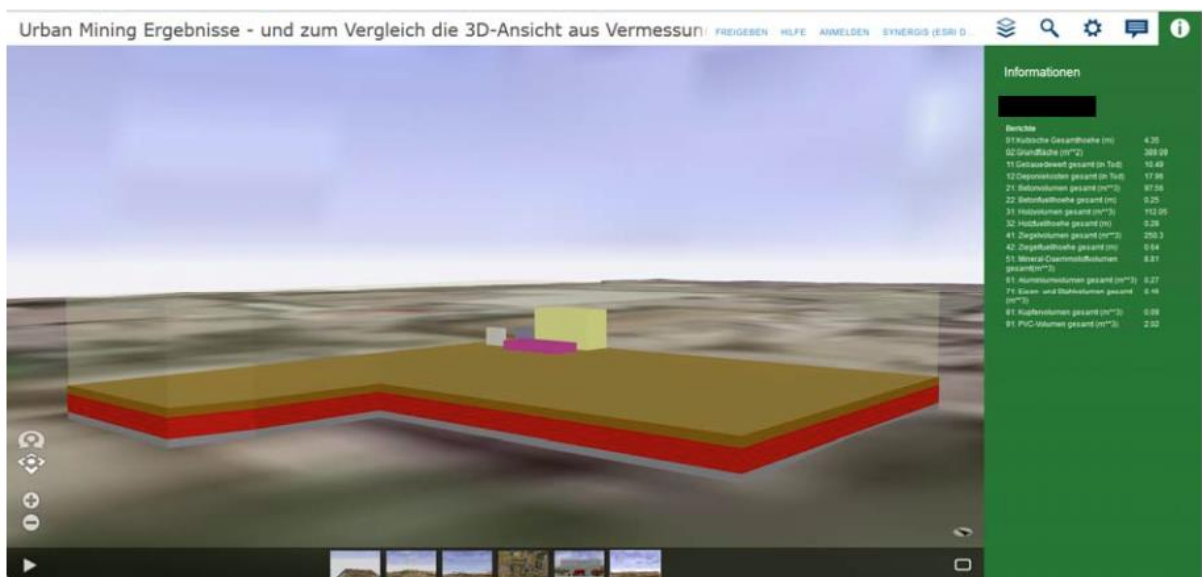


Abbildung 37: Materialkaster UMKAT auf Basis des 3D-Stadtmodells. Einzelbauwerkbetrachtung inkl. Auswertung. Quelle: Daxbeck et al. 2015: S. 134

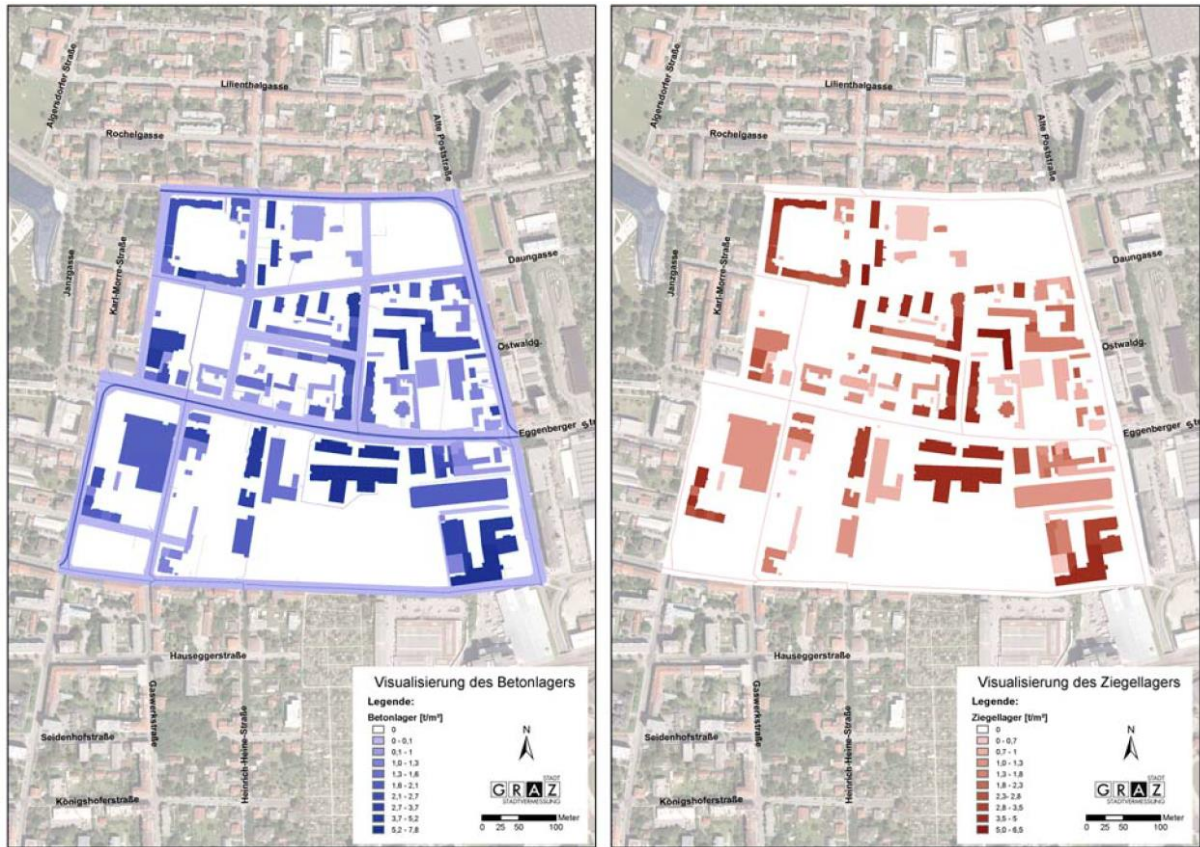


Abbildung 38: Visualisierung der Mengen zementgebundener Baustoffe (links) und keramischer Baustoffe (rechts) als Choropletenkarten. Quelle: Daxbeck et al., 2015: S. 138, S. 138

Die Abbildung 38 zeigt die Darstellung der Mengen zementgebundener Baustoffe und keramischer Baustoffe im Testgebiet Graz Eggenberg als 2D-Choropletenkarten. Die Farbabstufungen beziehen sich auf die Materialmenge und werden je dunkler, desto mehr Tonnen Material pro m² des Bauwerkes verbaut ist.

Obwohl der Materialkataster sich auf Bauwerke in unterschiedlichen Lebenszyklusphasen bezieht, stellt er dennoch eine Momentaufnahme dar (Schiller et al., 2022: S. 21).

Um die Dynamik von Gebäudebeständen abzubilden, kann die Veränderung deren materiellen Zusammensetzung über die Zeit durch maßgebliche Faktoren wie Neubau, Abriss oder Sanierungen prognostiziert werden. Das Ziel besteht darin, die Zugänge und Abgänge ganzer Gebäude oder Gebäudeteile vorherzusagen, um dadurch die mögliche Veränderung des gesamten Bauvolumens und somit der Materialmengen im Gebäudebestand zu ermitteln (Schiller et al., 2022; Bindreiter et al., 2022). Hierfür werden Szenarien auf Basis verschiedener Methoden und Daten erarbeitet, wie beispielsweise die Extrapolation von bisherigen jährlichen statistischen Bau- und Abbruchraten auf den bestimmten Zeithorizont, Ermittlung von Geschöß- und Flächenpotenzialen der Stadt durch analytische Auswertung vom Bebauungsplan, Leerstandserhebung, baualtersbezogene Abschätzung der Abrisswahrscheinlichkeiten, sowie Expert:innenworkshops zur Entwicklung und Plausibilisierung von Szenarien (ebd.). Die Visualisierung der Dynamik der

Materialmassen im Gebäudebestand kann ebenso in der GIS-Umgebung durchgeführt werden. Eine genauere Betrachtung dieses Ansatzes findet sich im Kapitel 4.3.7.

Der Datensatz des Materialkatasters ermöglicht die Bearbeitung verschiedener Fragestellungen im Zusammenhang mit der Materialität der Bauwerke. Dabei handelt es sich vor allem um die strategische Betrachtung, die sich auf die Gesamtheit potenzieller Materialressourcen im Gebäudebestand bezieht. Schiller et al. (2022) beschreiben folgende mögliche Anwendungsbereiche des Materialkatasters:

- **Stärkung von Recyclingkreisläufen**

Ein Materialkataster ermöglicht es, die Mengen, Qualität sowie die Zeitpunkte der Verfügbarkeit von Baumaterialien, die beim Abriss von Gebäuden anfallen, zu quantifizieren. Diese Daten können eine proaktive abfallwirtschaftliche Planung unterstützen, indem auf Basis dieser Daten das Recyclingpotenzial der anfallenden Materialien und daher die Mengen der daraus gewinnbaren Sekundärbaustoffe identifiziert werden können. Darauf aufbauend können die möglichen Kreislaufführungen dieser Materialien innerhalb der Stadt untersucht und geplant werden. Beispielsweise ermöglichen Informationen des Katasters die Berechnung potenzieller Einsatzmengen von Sekundärmaterialien für das prognostizierte städtisches Neubauvolumen in einem bestimmten Zeitraum, wodurch sich ermitteln lässt, in welchem Umfang die Sekundärmaterialien den Bedarf an Primärmaterialien für neue Bauvorhaben decken können (Schiller et al., 2022: S. 238-251).

- **Planung von Rohstoffbedarfen**

Dieser Anwendungsfall bezieht sich auf die Ermittlung des aus prognostizierter Bautätigkeit resultierenden Eigenbedarfes der Region an die Rohstoffe wie Sand, Kies, Ton / Lehm etc., die für Herstellung von Baumaterialien wie z.B. Beton oder Ziegel benötigt werden. Dabei sollten die Baumaterialmengen in die Mengen der dafür benötigten Rohstoffe umgerechnet werden. Die ermittelten Mengen können den für die Tagebauen genehmigten Rohstoffabbauungen gegenübergestellt werden, um den regionalen Rohstoffbedarf mit dem geplanten Rohstoffabbau für einen bestimmten Zeitraum zu vergleichen und im Sinne der Rohstoffsicherung zu betrachten. Damit kann beispielsweise festgestellt werden, inwiefern die genehmigten Rohstoffabbauungen mit der regionalen Rohstoffnachfrage übereinstimmen. Diese Analyse kann um die Aspekte der Ressourcenschonung erweitert werden, indem „neben Primärrohstoffen Sekundärstoffe direkt in das Kalkül der Rohstoffsicherung integriert werden“. Damit kann ermittelt werden, zu welchem Ausmaß die aus dem Abriss im

gleichen Zeitraum anfallenden Sekundärrohstoffe den Bedarf an Primärrohstoffen reduzieren können (*ebd.*).

- **Materialinduzierte Emissionen als Beitrag zur Klimaschutzdiskussion**

Die Daten und die Prognosefunktionalität des Materialkatasters ermöglichen die Ermittlung der aus Baumaterialeinsatz resultierenden Grauen Emissionen durch zukünftige Bauwerksbestandsveränderungen. Dafür sollten die Materialmengen der Bauwerke zu spezifischen Kennziffern für Graue Emissionen für jeweilige Materialien konvertiert werden. Durch Verschneidung dieser Daten mit der Prognose der Bestandsentwicklung können die daraus resultierenden Emissionen ermittelt werden. Dies ermöglicht die Prüfung städtischer Entwicklungsstrategien, wie beispielsweise Einführung CO₂-armer Bauweisen, stärkere Bestandsorientierung durch Senkung der Abrissquote oder die Verringerung des Wohnflächenkonsums, in Bezug auf deren Emissionsvermeidungspotenzial. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse bieten eine Grundlage für Diskussionen solcher Strategien hinsichtlich deren Effizienz bei Reduktion von Umweltauswirkungen der baulichen Stadtentwicklung (*ebd.*).

Daraus lässt sich auf eine komplexe Funktionalität des regionalen Materialkatasters schließen, die die planerische Betrachtung sowohl vom aktuellen als auch vom prognostizierten Zustand des Materiallagers im Gebäudebestand ermöglicht. Diese Daten bieten eine Grundlage für die integrierte Analyse verschiedener Aspekte des Ressourceneinsatzes auf der strategischen Ebene der Stadtentwicklung. Als digitales Tool baut der Materialkataster auf GIS und Geodaten auf, wodurch ein räumlicher Bezug und räumliche Visualisierung der Informationen hergestellt werden können.

Schiller et al. (2022) schlagen die Kombination von Materialinventaren und regionalen Materialkatastern in einem Informationsmanagementsystem als einen weiteren Entwicklungsschritt vor. Dieses Konzept stützt sich darauf, dass die Materialinventare der Bauwerke in der Region als Datenquellen für den regionalen Materialkataster verwendet werden. Dadurch kann der regionale Materialkataster die materialbezogenen Daten zu Bauwerksbeständen und deren Dynamik noch präziser abbilden, indem die detaillierten und lebenszyklusbegleitenden Datensätze der Materialinventare darin integriert werden (*Schiller et al., 2022: S. 28-29*). Die Abbildung 39 stellt diesen Ansatz grafisch dar. Daraus wird die mögliche Einbettung des Materialkatasters und dessen Bestandteile in das Umfeld der vorhin beschriebenen digitalen Planungstools, sowie die in diesem Kapitel beschriebenen Beispiele der Datenoutputs ersichtlich. So können die Materialinventare auf Basis von Planungsdaten aus BIM-Modellen, insbesondere im

IFC-Austauschformat, erstellt werden, sowie als Grundlage des Gebäudepasses fungieren. Die GIS kommen bei der Erstellung und Visualisierung von regionalen Materialkatastern zur Anwendung. Daraus lässt über die besondere Effizienz des Materialkasters als eines digitalen Informationsmanagementsystems schließen, das die Stärken verschiedener digitaler Technologien zwecks Unterstützung verschiedener Aufgaben der kreislauforientierten Planung vereint.

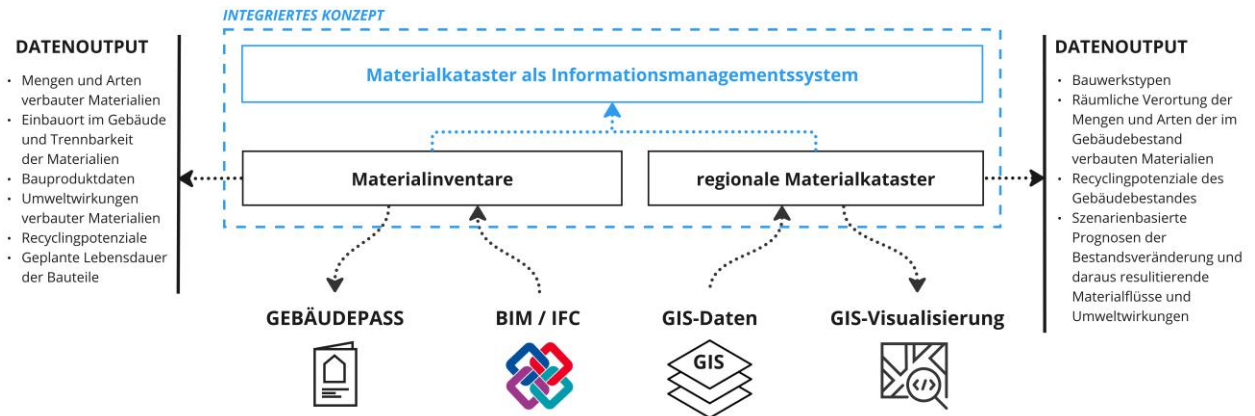


Abbildung 39: Integration der Materialinventare und der regionalen Materialkaster in einem Informationsmanagementsystem. Eigene Darstellung auf Basis von Schiller et al., 2022

3.4. Ansätze und Herausforderungen der kreislauffähigen Planung

Dieses Kapitel ergänzt die theoretischen Grundlagen durch Einblicke aus der Praxis der kreislauffähigen Planung. Für ein vertieftes Verständnis der praxisrelevanten Aspekte wurden fünf Expert:innen mit spezifischer Erfahrung und Fachkenntnis im Bereich der kreislauffähigen Planung interviewt (Details zu den Expert:innen und ihrer Expertise finden sich im Kapitel 1.5). Die aus diesen Gesprächen gewonnenen Erkenntnisse bilden die Basis für die Identifikation der Herausforderungen und Ansätze bei der Implementierung kreislauffähiger Planungsansätze. Im Folgenden werden diese Herausforderungen nach übergeordneten Themenbereichen strukturiert, die aus der Auswertung der Interviews hervorgegangen sind.

3.4.1. Parameter und Indikatoren der Kreislauffähigkeit

Die Beurteilung der Kreislauffähigkeit erfordert klar definierte Indikatoren, die als messbare Kriterien für kreislauffähige Ansätze dienen sollten und eine Bewertung von Bauwerken in dieser Hinsicht ermöglichen (*Macho, 2024; Sustr, 2024; Edlinger, 2024*).

Aus Sicht der interviewten Expert:innen besteht die Herausforderung darin, Indikatoren zu entwickeln, die einerseits realistisch im Hinblick auf den aktuellen Stand der Technik und andererseits nachvollziehbar hinsichtlich ihrer Parameter sind (*Macho, 2024; Sustr, 2024; Edlinger, 2024*). Rosen (2021) hebt in ihrer Dissertation „Urban Mining Index“ die Bedeutung der Integration solcher Indikatoren in den Entwurfsprozess hervor. Insbesondere sollte die Kreislauffähigkeit als Entwurfsparameter begriffen werden, um die Ressourceneffizienz von Gebäuden durch quantitative Bewertungsmaßstäbe messbar zu machen (*Rosen, 2021: S. 6*). Darauf aufbauend stellt Rosen (2021) die Frage, welche Parameter, Einheiten sowie Bewertungsebenen (von Bauteil bis zu Materialien) geeignet sind, um die Kreislaufpotenziale der Bauwerke zu bemessen.

Als effektives Instrument könnte hierbei die Wiener Bauordnung fungieren. Durch die Verankerung dieser Indikatoren in der Bauordnung als Bewilligungskriterien für Bauvorhaben lassen sich konkrete Anforderungen hinsichtlich der Kreislauffähigkeit von Projekten stellen. Dies würde nicht nur die Messung des Erfüllungsgrades ermöglichen, sondern auch dazu beitragen, die Kreislaufwirtschaft auf regulatorischer Ebene zu verankern und die Integration kreislauffähiger Planungsansätze in die Praxis zu fördern (*Edlinger, 2024*).

3.4.2. Erkennung und Nutzung lokaler Potenziale

Im Kontext des Städtebaus und des Bauwesens umfassen die lokalen Potenziale die Verfügbarkeit und Nutzungsmöglichkeiten von Materialien, Gebäuden, Böden und Flächen, die in verschiedene Kreisläufe der Weiternutzung, des Recyclings oder der Wiederverwendung zugeführt werden

können. Hierbei betont Herr Romm (2024), dass das zirkuläre Bauen sich nicht nur auf den Rückbau bezieht, sondern alle Bauvorhaben beeinflusst, insbesondere durch die Notwendigkeit, mit den Ressourcen nachhaltig umzugehen. Dafür ist insbesondere die Interpretation der vorhandenen Ressourcenumgebungen sowie integrierte Betrachtung verschiedener Planungsdimensionen und deren Wechselwirkungen notwendig (Romm, 2024).

„Und das sind die Herausforderungen, vor denen wir stehen – dass wir erkennen, dass das Bauen auch Gegenstand des Städtebaus ist und sein muss. Also der Städtebau hat immer auch eine materielle Dimension. Und diese materielle Dimension ist aber ein wenig auch in der Fassung, in dem Selbstverständnis des städtebaulichen Vorgehens. Beispielsweise in der Stadt der kurzen Wege als Paradigma kommt die Materialität der Stadt gar nicht mehr vor. Aber diese kurzen Wege gelten ganz, ganz genauso für die Herstellung der Stadt wie für die Funktion der Stadt.“ (Romm, 2024)

In diesem Kontext liegt die Bedeutung der Erkennung der lokalen Potenziale darin, dass durch Nutzung der am Standort vorhandener Ressourcen, wie beispielsweise hochwertig verwertbare Aushübe und Böden, kann der Massentransport von und zu Baustelle erheblich reduziert werden, (Romm, 2024). Solche Reduktion lässt sowohl Ressourcen und CO₂ als auch Transportkosten einsparen, wodurch sowohl ökologische als auch wirtschaftliche Vorteile erzielt werden können.

In Bezug auf die Verwendung der Ressource Böden, spricht Herr Romm über das in seiner Praxis zur Anwendung kommende „Circular Soil“-Konzept. Dabei handelt es sich um eine „ganz differenzierte Betrachtung der Ressourcen und deren Möglichkeiten, die ein Ort mit sich bringt“, vor allem Böden und der vielfältigen Wege deren zirkulären Weiterverwendung (Romm, 2024). Beispielsweise können die hochwertigen Oberböden, die sich in neuen Stadtentwicklungsgebieten Wiens vorfinden, den Nutzungen wie die städtische Landwirtschaft oder Gebäudebegrünung zugeführt werden. Die Unterböden, wie z.B. sandige und kiesige Aushübe im 2., 20. oder 21. Bezirk Wiens, oder lehmige Aushübe in südlichen Wiener Entwicklungsgebieten bieten hingegen hohe Potenziale für die Baustoffindustrie (Romm, 2024).

Eine wesentliche Voraussetzung ist hierbei die Analyse und Bewertung der Bodenbeschaffenheit und weiterer technischer, ökologischer und abfallrechtlicher Aspekte bereits in den frühen Planungsphasen, um die Strategien der Nutzung lokaler Ressourcen, wie z.B. Böden, umfassend auszuarbeiten sowie deren Machbarkeit evaluieren zu können (Romm, 2024). Dafür ist insbesondere wichtig die an dem Planungsprozess beteiligten Fachplaner:innen in einem integrierten Ansatz in die Prozessplanung der lokalen Verwertungskonzepte miteinzubeziehen, um die komplexen Zusammenhänge und die Abläufe effizient zu koordinieren (Romm, 2024).

Des Weiteren stellen aus Sicht von Herrn Romm die Mittel und Maßnahmen der Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) eine umfassende und geeignete Basis für die zirkuläre

Entwicklung von Großprojekten dar. Diese Maßnahmen sollten idealerweise zum Standardinstrumentarium des Städtebaus gehören und damit „im großen Rahmen eine UVP überflüssig machen und ersetzen“ (Romm, 2024). Hierbei handelt es sich beispielsweise um die Materiallogistikkonzepte zur Reduktion des Massentransports sowie um die Bodennutzungskonzepte, die ursprünglich als Maßnahmen für UVP-pflichtige Projekte wie die Seestadt Aspern erarbeitet wurden. Diese Maßnahmen bieten eine effiziente Grundlage für die zirkuläre und umweltschonende Wertschöpfung wie die Geländemodellierung, baustoffliche Verwertung des Aushubes sowie Verringerung des Transportaufwandes. Sie sollten daher sowohl in Entwicklungszielen festgelegt als auch im Bau implementiert und weiterentwickelt werden, um so die Prinzipien der Kreislaufwirtschaft in den Städtebau zu integrieren. Hierbei kommt den frühen Phasen der städtebaulichen Planung eine besondere Bedeutung zu, als den Phasen, in der diese Prozesse initiiert und ausgearbeitet werden sollen (Romm, 2024).

„Es sind also Wertschöpfungskonzepte, die auf Zirkularität beruhen und sehr stark schon in Bebauungsbestimmungen oder in städtebaulichen Zusammenhängen geklärt werden können und initiiert werden können.“ (Romm, 2024)

Im Planungsprozess mit Wiederverwendung von Bauteilen besteht die grundlegende Aufgabe ebenso darin, den Quellbestand aufzunehmen und hinsichtlich der Re-Use-Potenziale zu analysieren (Angehrn, 2024). Wie Herr Angehrn aus der Erfahrung beim Umbau des Bahnhofareals in Zürich⁷ erzählt, kann sich diese Analyse sowohl auf den konkreten Standort als auch auf den Immobilienbestand des Auftraggebers beziehen. Für dieses Sanierungs- und Revitalisierungsprojekt wurden die Re-Use-Bauteile schweizweit aus dem gesamten Bestand des Auftraggebers, der Schweizer Bundesbahnen, gesammelt. Insbesondere wurden die Fahrleitungsmasten nach einer Anpassung als Tragkonstruktion im Innenraum eines denkmalgeschützten Gebäudes eingebaut (Angehrn, 2024). Des Weiteren beschreibt Herr Angehrn die Re-Use-Planung als einen iterativen Entwurfsprozess, der von Anfang an eine klare, aber flexible Projektidee erfordert und sich an den verfügbaren Bauteilen orientiert. Zu Beginn des Projekts werden die Anforderungen an die Bauteile definiert, wie Größe, Materialität sowie technische und ästhetische Ansprüche, woraufhin die Suche nach passenden Bauteilen erfolgt. Darauf aufbauend werden die planerischen Lösungen des Entwurfs in Abstimmung mit Auftraggeber:innen angepasst und umgesetzt. In diesem Zusammenhang stellt die Analyse von potenziellen Bauteilquellen, z.B. von aktuellen Rückbaustellen oder regionalen Bauteilbörsen, einen grundlegenden Schritt für Re-

⁷ <https://sbb-immobilien.ch/story/werkstadt-zuerich-aus-alt-mach-neu/>

Use-Planung dar. Diese Analyse sollte insbesondere bereits in der Vorplanung stattfinden, um effiziente Koordination der Bauteilbeschaffung, des Entwurfes und der Logistik zu ermöglichen (Angehrn, 2024).

Allerdings liegt das höchste Potenzial hinsichtlich Ressourcen- und CO₂-Einsparung bei der Bestandserhaltung im Sinne dessen Weiterbauens und Sanierens (Angehrn, 2024; Romm, 2024). Dieser Ansatz ist wesentlich effizienter, als Gebäude lediglich als Materialquelle zu betrachten und demnach den Abriss durch Materialgewinnung zu rechtfertigen (Angehrn, 2024). Laut Berechnungen von in situ⁸, binden Bestandsgebäude so viel CO₂, dass kein Netto-Null-Ersatzneubau die durch den Abriss verlorene CO₂-Bindung ausgleichen kann. In diesem Zusammenhang ist es wichtig, im Bestand zu arbeiten und diesen zu erhalten, um eine deutliche CO₂-Einsparung und Ressourcenschonung zu erzielen (ebd.). Die Anpassung, Sanierung und Transformation des Bestandes sind aus kreislaufwirtschaftlicher Perspektive die vorrangigen Prinzipien einer nachhaltigen Stadterneuerung, denn wie Herr Romm betont, liegt die zirkuläre Effizienz in der Resilienz der Bestandstrukturen (Romm, 2024).

3.4.3. Aufbau einer Struktur zur Bauteil- und Materialvermittlung

Der Aufbau einer Struktur zur Materialvermittlung zielt darauf ab, den Austausch von Ressourcen wie Böden, Sekundärmaterialien und Re-Use-Bauteilen zwischen Projekten zu ermöglichen, um Angebot und Nachfrage effektiv zu vernetzen.

Die Schaffung einer Materialvermittlungsstruktur bezieht sich auf die Einrichtung einer zentralisierten Plattform, die notwendige Informationen über Mengen, Typen und Verfügbarkeit der Materialien und Bauteilen bereitstellen kann (Sustr, 2024). Die Funktion dieser Plattform sollte darin bestehen, potenzielle Abgeber:innen und Abnehmer:innen von Materialien zu vernetzen (ebd.). Solche Plattformen, bekannt als Bauteil- oder Materialbörsen, existieren bereits in verschiedenen Ländern und bieten entweder die Sekundärmaterialien und Re-Use-Bauteile aus eigenen Lagerbeständen an oder vermitteln die Angebote.

Die Herausforderung dabei liegt aus Sicht von Herrn Angehrn (2024) darin, dass Bauteilbörsen teilweise noch nicht die Professionalisierungsstufe erreicht haben, die in der Baubranche üblicherweise von Materiallieferanten erwartet wird. Zusätzlich stellt die Tatsache, dass die bei Bauteilbörsen verfügbaren Liefermengen, sowie die Auswahl der Produkte im Vergleich zu Anbietern von Neuware wesentlich geringer sind (Sustr, 2024), ein Problem für die Etablierung der Bauteilbörsen als Materiallieferanten dar.

⁸ Baubüro in situ, siehe Kapitel 1.5

Aus Sicht von Herrn Romm (2024) können die Vermittlungsstrukturen nicht allein durch Nachfrage von Endkonsumenten und Architekt:innen entstehen, die Re-Use-Bauteile in ihrer Planung verwenden wollen. Es sollte eine breitere Gruppe verschiedener Expert:innen und Akteure vernetzt werden, um einerseits den fachkundigen Rückbau und andererseits die Prozesse der Abnahme von Materialien und Bauteilen effektiv zu organisieren. Dieses Netzwerk sollte beispielsweise Baustoffindustrie und Produkthersteller einbinden, die als wichtige Abnehmer von Ressourcen wie Böden oder Sekundärmaterialien aus den Rückbauten für die Baustoffherstellung oder das Recycling und die Produktion fungieren können (Romm, 2024).

Ein weiterer bedeutender Aspekt sind aus Sicht der Expert:innen Macho und Sustr die Kosten für die Demontage, Aufbereitung und Lagerung der Re-Use-Bauteile. Diese Kosten schlagen sich letztendlich in den Preisen nieder, wodurch die Verwendung von Re-Use-Bauteilen im Vergleich zu neuen Bauteilen kaum wirtschaftlich wird (Macho, 2024; Sustr, 2024).

Daraus lässt sich schließen, dass die stabile Nachfrage eine wesentliche Voraussetzung für die Entwicklung der Vermittlungsprozesse und einer entsprechenden Plattform darstellt. Die Bedeutung dieses Aspektes wird von den Expert:innen Macho und Sustr (2024) hervorgehoben, insbesondere im Hinblick auf die Herstellung und Verwendung von Materialien aus recycelten Altstoffen. Die Unternehmen, die sich mit der Herstellung der Bauteile aus Recycling-Materialien beschäftigen, verfügen aktuell nicht über ausreichende Kapazitäten für Großprojekte, die wiederum notwendig sind, um einen Markt für solche Materialien zu etablieren (Macho, 2024; Sustr, 2024).

Dabei kommt aus Sicht der Expert:innen eine besondere Rolle der öffentlichen Hand zu, die als Akteur auf der Nachfrage-Seite fungieren kann und durch Integration der kreislauffähigen Produkte in eigene Projekte einen Wettbewerb generieren kann (Macho, 2024; Sustr, 2024; Romm, 2024).

Für den Aufbau einer Struktur zur Bauteil- und Materialvermittlung sind daher nicht nur technischen Schritte wie die Herstellung einer zentralen Plattform erforderlich, sondern vor allem eine kooperative Vernetzung verschiedener Akteure wie Planer:innen, Rückbauexpert:innen, Endkonsumenten sowie Baustoff- und Materialhersteller. Darüber hinaus sollten Maßnahmen ergriffen werden, die Nachfrage nach umweltfreundlicheren Materialien und Bauteilen sowie deren Wirtschaftlichkeit anzukurbeln.

3.4.4. Digitale Datengrundlage für die kreislauforientierte Planung

Die Erstellung einer digitalen Datengrundlage für die kreislauforientierte Planung ist ein essenzieller Schritt, der informierte, datengestützte Entscheidungen im Planungsprozess ermöglicht. Diese Grundlage erfordert insbesondere aktuelle und umfassende Daten über die materielle Zusammensetzung der Bauwerke sowie über die Beschaffenheit der Böden.

Diese Daten können diverse Anwendungsfälle in verschiedenen Planungsmaßstäben unterstützen: von der Identifikation der Verwertungspotenziale von Böden in der städtebaulichen Planung bis hin zur Voruntersuchung von Schad- und Störstoffen in Baukonstruktionen im verwertungsorientierten Rückbau (Romm, 2024). Darüber hinaus können die auf regionaler Ebene aggregierten Daten über die Materialität der Bauwerke eine wichtige Grundlage für die strategische Planung im Rahmen der Bewirtschaftung der Materialressourcen des Gebäudebestandes bieten (Bindreiter et al., 2022: S. 13). Zur Erfassung der materiellen Zusammensetzung einzelner Bauwerke kommen Methoden wie die 3D-Vermessung, Analyse der Plandokumentation und manuelle Bestandsaufnahme sowie BIM-Modellierung zur Anwendung (Angehrn, 2024; Macho, 2024; Sustr, 2024). Die Wahl der Methoden variiert dabei je nach spezifischen Informationsanforderungen der Vorhaben.

Beispielsweise ermöglicht die 3D-Vermessung bei Umbau- und Sanierungsvorhaben eine effiziente automatisierte Bestandserfassung als Punktwolke, die direkt in BIM-Modelle als Bestandsmodell integriert werden kann (Macho, 2024; Sustr, 2024).

Im Rahmen der Re-Use-Projekte, bei denen ein bauteilgenauer Detailgrad erforderlich ist, eignen sich die 3D-Vermessung und die daraus abgeleiteten BIM-Modelle lediglich zur Evaluierung der allgemeinen Ressourcenpotenziale der Bestandsgebäude, da solche Aufnahmen die Präzisionsanforderungen der Re-Use-Planung noch nicht erfüllen (Angehrn, 2024). Aus diesem Grund werden die Bauteile des Gebäudes manuell aufgenommen und anschließend in BIM-konformen Formaten modelliert, was einen umgekehrten Prozess im Vergleich zur standardmäßigen BIM-Methodik darstellt (ebd.).

Die Plandokumentation, insbesondere die analogen oder digitalen Einreichpläne der Baupolizei (MA37), bietet eine Grundlage für die Bestandserhebung. Allerdings bilden diese Pläne den geplanten Zustand ab, während für eine präzise Erhebung von Mengen und Typen der verbauten Materialien der tatsächlich ausgeführte Zustand optimal ist. Dennoch können die Einreichpläne zur groben Abschätzung der Mengen und Arten der verbauten Materialien herangezogen werden (Macho, 2024; Sustr, 2024; Edlinger, 2024). Darauf kann auch eine flächendeckende Erfassung des ganzen städtischen Gebäudebestandes aufbauen. Dafür sollten allerdings Methoden entwickelt werden, die eine teilautomatisierte Bearbeitung und Auswertung der Planzeichnungen ermöglichen. Solche Methoden könnten etwa die Analyse von digitalisierten Plänen mit Künstlicher Intelligenz umfassen, um die Mengen und Typen der verbauten Materialien zu ermitteln (Macho, 2024; Sustr, 2024).

Als weitere potenzielle Quelle digitaler Gebäudedaten wird von den Expert:innen die Digitale Einreichung der Stadt Wien angesehen (Macho, 2024; Sustr, 2024; Edlinger, 2024). Insbesondere handelt es sich um das Forschungs- und Entwicklungsprojekt BRISE, das in Kooperation der Stadt Wien mit der TU Wien, BIM-Expert:innen sowie der Ziviltechniker-Kammer für Wien,

Niederösterreich, Burgenland umgesetzt wurde (*Digitales Wien, 2024*). Im Rahmen dieses Projektes wurde ein digitales Genehmigungsverfahren entwickelt, wobei BIM-Modelle mittels Künstlicher Intelligenz und Augmented Reality automatisiert auf die Einhaltung von Rechtsvorschriften geprüft werden (*ebd.*). Eine denkbare Entwicklung ist es, dass in diesem Verfahren eingereichte BIM-Modelle in Zukunft auch zur Erfassung von materialbezogenen Gebäudedaten dienen und somit zur Erstellung des Materialkatasters als Datenbank der materiellen Zusammensetzung des städtischen Gebäudebestandes beitragen können (*Macho, 2024; Sustr, 2024; Edlinger, 2024*). Darüber hinaus stellt aus Sicht der Expert:innen der materielle Gebäudepass (*vgl. Kapitel 3.3.3*) ein geeignetes Instrument für die flächendeckende Erfassung der materialbezogenen Gebäudedaten in digitaler Form dar (*Macho, 2024; Sustr, 2024*). Eine wesentliche allgemeine Anforderung an die Datenquellen, die von Expert:innen betont wurde, ist die Aktualität der Daten. Idealerweise sollten die BIM-Modelle sowie die materiellen Gebäudepässe den tatsächlich gebauten Zustand abbilden, insbesondere nach der Fertigstellung des Gebäudes entsprechend dem ausgeführten Zustand aktualisiert werden (*Macho, 2024; Sustr, 2024; Edlinger, 2024*).

Die Zentralität der Daten ist eine wesentliche Voraussetzung, um die Gebäudedaten aus verschiedenen Quellen auf den städtischen Maßstab skalieren und den Planer:innen zur Verfügung stellen zu können. Dabei muss geklärt werden, welche Akteure für die Erhebung und Wartung der Daten verantwortlich sind, wer die Datenhoheit besitzt und in welcher Form die Daten den Planer:innen bereitgestellt werden (*Macho, 2024; Sustr, 2024; Edlinger, 2024*). Die Expert:innen sehen hierbei die Stadt Wien in einer Schlüsselrolle für Datenverwaltung und Datenhoheit, was eine günstige Voraussetzung sowohl für den Datenschutz als für die Zentralität und Integration der Daten, etwa mit dem digitalen Zwilling der Stadt Wien (*vgl. Kapitel 3.1.1*), schaffen sollte (*Macho, 2024; Sustr, 2024; Edlinger, 2024*).

Aus Sicht der Expert:innen stellt die Implementierung der Ansätze der Datenerhebung und der datengestützten Planung einen entscheidenden Schritt für die Beurteilung ihrer Eignung und Effizienz dar (*Macho, 2024; Sustr, 2024*). Denn erst durch die praktische Anwendung können die Methoden optimiert und die Anforderungen präzisiert werden, um die Entwicklung einer umfassenden Datengrundlage voranzutreiben (*ebd.*).

3.4.5. Anreize und Vorgaben für kreislaforientierte Planung

Die Schaffung der Anreize für die kreislaforientierte Planung ist eine komplexe Herausforderung, die einerseits Aspekte wie die Definition und Implementierung der normativen und regulativen Vorgaben und andererseits finanzielle Anreize umfasst.

Die Expertin Edlinger nennt die Wiener Bauordnung als ein wichtiges Instrument, um die Kreislaufwirtschaft auf einer gesetzlichen Ebene in der baulichen Stadtentwicklung zu verankern.

Durch Festlegung von Vorgaben kann sie die Implementierung kreislauforientierter Planungsansätze systematisch regulieren. Insbesondere können darin Anforderungen an die Bauwerke sowie an die Gebäudedokumentation im Sinne der kreislauforientierten Planung definiert werden, um somit einen rechtlichen Rahmen für die Umsetzung spezifischer Ansätze und für die Anwendung relevanten digitalen Instrumente zu schaffen. Beispielsweise wurde durch die Bauordnungsnovelle 2020 die digitale Übermittlung von Einreichplanunterlagen rechtlich ermöglicht. Ein ähnliches Verfahren könnte genutzt werden, um den materiellen Gebäudepass als erforderliche Unterlage für in der Einreichung und in der Fertigstellungsanzeige sowie die Modalität der BIM-basierten Bewilligungsverfahren auf der gesetzlichen Ebene festzuhalten (*Edlinger, 2024*).

Ein weiteres Instrument zur Festlegung relevanter Vorgaben für kreislauforientierte Planung stellt OIB Richtlinie 7 „Nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen“ des Österreichischen Instituts der Bautechnik. In dieser Richtlinie können insbesondere die Anforderungen an den Detailgrad und die Struktur des materiellen Gebäudepasses festgelegt werden, um die Implementierung dieses Instrumentes zu unterstützen (*Edlinger, 2024; Macho, 2024; Sustr, 2024*).

Als bedeutendes Hemmnis für die Umsetzung kreislauforientierter Planungsansätze inklusive Verwendung von Re-Use-Bauteilen und Sekundärmaterialien wird von den Expert:innen der zu niedrige CO₂-Preis identifiziert. Sowohl in Österreich als auch in der Schweiz sehen die Expert:innen den CO₂-Preis als zu niedrig, um den Anreiz für CO₂-Einsparung zu schaffen (*Macho, 2024; Sustr, 2024; Angehrn, 2024*). Insbesondere wird dadurch die Wettbewerbsfähigkeit der CO₂-armen Baumaterialien oder der Wiederverwendung von Bauteilen beeinträchtigt, da die Preise der konventionellen Baustoffe oder neuen Bauteile die Umweltkosten nicht widerspiegeln und daher im Vergleich zu kreislauf- und umweltgerechten Alternativen oft günstiger sind (*Macho, 2024; Sustr, 2024*).

Als wichtiger Hebel zur Unterstützung des kreislauforientierten und umweltschonenden Planen und Bauen werden von Expert:innen die Förderungen angesehen. Sie sollen insbesondere dazu beitragen, die aktuell bestehenden kostenseitigen Barrieren gegenüber konventionellen Methoden zu überwinden und dadurch die Akzeptanz und Implementierung kreislauforientierter Ansätze unterstützen, was letztendlich den Wandel in der Baubranche und die Dekarbonisierung von Gebäuden und Städten in den kommenden Jahren vorantreiben soll (*Angehrn, 2024; Edlinger, 2024; Macho, 2024; Sustr, 2024*).

4. MATERIALKATASTER ALS PLANUNGSUNTERSTÜTZUNGSSYSTEM

4.1. Grundlagen der Funktionsanalyse

Die Methode der Funktionsanalyse besteht darin, die Gesamtfunktionen eines Systems zu identifizieren, in ihre Teilfunktionen zu zerlegen und in Form eines Funktionsmodells darzustellen. Diese Methode wird insbesondere für die Untersuchung der bestehenden Systeme verwendet, um deren Funktionsstruktur abzubilden (Kirchner, 2020: S. 140-141). Kirchner (2020) bezeichnet ein technisches System als nach bestimmten Regeln geordneter Zusammenhang durch gegenseitige Beziehungen verknüpfter Elemente, die sich wiederum über Merkmale und Eigenschaften beschreiben lassen (ebd.: S. 110).

4.1.1. Sichtweisen der Systembetrachtung

Ein System kann anhand verschiedener Sichtweisen abgebildet werden, die unterschiedliche Aspekte des Systems im Fokus haben. Die Zusammenhänge und Verknüpfungen zwischen den Elementen eines Systems können nach drei folgenden systemtheoretischen Konzepten betrachtet werden (Abbildung 40).

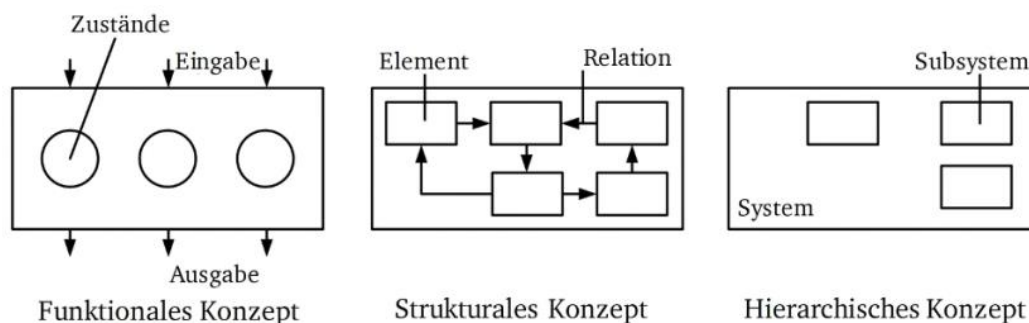


Abbildung 40: Funktionales, struktureles und hierarchisches Konzept zur Modellierung von Systemen. Quelle: Freund, 2018, zitiert in Kirchner, 2020

Das funktionale Konzept beschreibt das System anhand seiner Eigenschaften und der zu erfüllenden Aufgaben, wobei die technischen Prozesse innerhalb des Systems für die Systemnutzer außer Betracht bleiben. Der innere Aufbau und die Gestaltung des Systems werden somit nicht im Detail dargestellt. Stattdessen steht die allgemeine Funktion des Systems und dessen Interaktion mit der Umgebung im Vordergrund der Betrachtung (Kirchner, 2020: S. 110-112).

Das strukturele Konzept betrachtet das System als Gesamtheit dessen miteinander verbundener Bestandteile, wobei der Fokus auf die Eigenschaften der Elemente und die Art deren Relationen gelegt wird. Die Bestandteile des Systems und deren Schnittstellen zueinander werden dabei

funktional beschrieben, um dadurch die innere Struktur des Systems abzubilden und das Verhalten des Gesamtsystems aufzuzeigen (*ebd.*).

Das hierarchische Konzept gliedert das System in einzelne Bestandteile, die selbst als Systeme betrachtet werden und einer weiteren Gliederung unterliegen, wobei jeder Bestandteil entweder als Subsystem eines umfassenderen Systems oder als Supersystem für ein System niedrigerer Ebene definiert wird. Diese Sichtweise ermöglicht eine Darstellung des Systems auf verschiedenen Detaillierungsebenen, wobei sowohl der Aufbau der Bestandteile als auch deren Wechselbeziehungen abgebildet werden (*ebd.*).

In der vorliegenden Arbeit wird das strukturelle Konzept als Grundlage für die Funktionsmodellierung des idealtypischen Modells des Materialkatasters verwendet, um die grundlegenden funktionalen Elemente sowie Art ihrer Beziehungen zueinander innerhalb der Plattform abzubilden.

4.1.2. Darstellungsformen der Funktionsmodelle

Ein Funktionsmodell kann in verschiedenen Formen dargestellt werden. Die Auswahl der Darstellungsform hängt von der Aufgabenstellung der Analyse sowie der Sichtweise auf das System ab. Ponn & Lindemann (2008) unterscheiden zwischen folgenden Darstellungsformen der Funktionsmodellen.

Funktionsliste ist die einfachste Form des Funktionsmodells. Dabei werden die Funktionen aufgelistet, ohne deren Vernetzung oder Hierarchie zu erfassen. Die Methode eignet sich insbesondere für die erste Zusammenfassung der Funktionen eines Systems, um diese in weiterer Folge im Hinblick auf deren Hierarchie und Vernetzung zu untersuchen (*Ponn & Lindemann, 2008: S. 60-63*).

Funktionsbaum stellt das Modell sowohl strukturell als auch hierarchisch dar. Das System wird in die Gesamtfunktion und die dafür erforderlichen Teilfunktionen aufgeteilt. Diese Darstellungsmethode umfasst die strukturelle und hierarchische Sichtweise auf das System und bietet somit einen Überblick über die Anordnung und Zusammengehörigkeit der Funktionen innerhalb des Systems (*ebd.*).

Funktionsnetz veranschaulicht die netzwerkartigen Beziehungen zwischen den Funktionen des Systems und ähnelt insofern einem ereignisbasierten Prozessdiagramm. Dabei können beispielsweise die Zusammenhänge und Informationsflüsse zwischen den Funktionen und Zuständen dargestellt werden (*ebd.*).

Für die Vorstellung des idealtypischen Modells des Materialkatasters wird die Darstellungsform des Funktionsnetzes verwendet. Diese Methode ermöglicht es, die Struktur der Funktionen sowie die Informationsflüsse und Outputs übersichtlich abzubilden, was für das Verständnis der Funktionsweise und Datenlandschaft des Materialkatasters notwendig ist.

4.2. Einordnung der Planungsunterstützungssysteme

Wie im Kapitel 3.3.4 definiert, stellt der Materialkataster eine Datenbank der im Gebäudebestand verbauten Materialien dar, die eine räumliche Verortung und Kumulierung auf unterschiedlichen räumlichen Ebenen dieser Daten ermöglicht. Im Hinblick auf die Bedeutung dieser Daten für die kreislaufgerechte Planung und Urban Mining, kann der Materialkataster als ein digitales Instrument betrachtet werden, das die Abwicklung der einhergehenden Planungsaufgaben unterstützen kann. Solche Tools werden in der Literatur als Planungsunterstützungssysteme (Planning Support Systems (PSS)) sowie als Entscheidungsunterstützungssysteme (Decision Support Systems (DSS)) bezeichnet und können verschiedenen Disziplinen zugeordnet werden.

Ein Planungsunterstützungssystem (PSS) wird als ein „*Instrument zur Unterstützung der Planungsbeteiligten bei der Erfüllung ihrer spezifischen Aufgaben*“ definiert (Batty, 1995, Klosterman, 1997, zitiert in Geertman et al., 2013: S. 1, eigene Übersetzung).

Der Zweck der PSS besteht darin, die Planungsbeteiligten bei der Entdeckung, Darstellung, Analyse, Visualisierung, Vorhersage, dem Design, der Umsetzung, dem Monitoring und der Diskussion der mit dem Planungsbedarf verbundenen Angelegenheiten zu unterstützen (Batty, 1995, zitiert in Vonk, 2006: S. 64, eigene Übersetzung).

Obwohl die meisten PSS auf Geoinformationssystemen (GIS) als Mittel zur Speicherung, Verwaltung und Darstellung räumlicher Daten aufbauen, zeichnet sich jedes PSS durch seinen eigenen Schwerpunkt bei der Unterstützung einer spezifischen Planungsaufgabe aus und kann daher einen eigenen Satz von Komponenten enthalten (Geertman et al., 2013: S. 1).

Planungsunterstützungssysteme (PSS) sind den Entscheidungsunterstützungssystemen (DSS) verwandt, unterscheiden sich jedoch im Hinblick auf ihren primären Fokus: Während PSS die Lösung von langfristigen Aufgabenstellungen und strategischen Fragen verfolgen, sind DSS auf die Unterstützung kurzfristiger Entscheidungen durch einzelne Personen oder Unternehmen ausgerichtet (Clarke, 1990, zitiert in Geertman et al., 2013: S. 1).

Ein Materialkataster lässt sich als eine Kombination dieser beiden Typologien von digitalen Systemen betrachten, da die in der Planung, insbesondere im Baubereich, anfallenden Aufgabenstellungen oftmals mit der einhergehenden kurzfristigen Entscheidungsfindung verbunden sind. Aus diesem Grund, und im Hinblick auf das definierte Erkenntnisinteresse für die

Anwendung dieses Tools im Planungsprozess, wird die Urban Mining Plattform in dieser Arbeit als ein Planungsunterstützungssystem (PSS) verstanden und entsprechend analysiert.

In Anlehnung an Burrough und McDonell (1998) definiert Vonk (2006) die folgenden Grundfunktionen eines PSS in Bezug auf die Handhabung der Daten und Informationen im Planungsprozess:

1. **Erhebung der Information** (*information gathering*)
2. **Speichern und Abrufen der Information** (*information storage and retrieval*)
3. **Visualisierung der Information** (*information visualization*)
4. **Kommunikation der Information** (*information communication*)
5. **Analyse der Information** (*information analysis*)
6. **Modellierung der Information** (*information modelling*)

Im darauffolgenden Kapitel werden die bestehenden Materialkataster als Planungsunterstützungssysteme betrachtet und in Bezug auf die Ausgestaltung dieser Grundfunktionen analysiert. Daraus sollte eine Grundlage für das Verständnis über die Funktionalität und Potenziale des Materialkatasters als Tool zur Unterstützung der kreislaforientierten Planung geschaffen werden.

4.3. Funktionsanalyse bestehender Materialkataster

Dieses Kapitel befasst sich mit der Analyse bestehender Materialkataster als Tools zur Unterstützung der kreislaforientierten Planung. Hierbei werden insbesondere der Systemaufbau und die Funktionalität dieser Tools untersucht, um ein Verständnis über deren Potenziale für die Anwendung im Planungsprozess zu gewinnen.

Als Beispiele wurden die Plattformen M-DAB, BIMstocks und Madaster ausgewählt, um einen umfassenden Überblick über die möglichen Funktionen der Materialkataster herzustellen. Die Plattformen werden bezüglich der Ausgestaltung der im vorigen Kapitel erläuterten Grundfunktionen der Planungsunterstützungssysteme strukturell analysiert.

Die Analyse der Funktionalität der Plattformen M-DAB und BIMstocks basiert auf den Projektberichten „Materialressourcen der Stadt digitalisieren, analysieren und nachhaltig bewirtschaften“ von Bindreiter et al. (2022) für M-DAB und „Digital Urban Mining Platform: Assessing the material composition of building stocks through coupling of BIM to GIS“ von Honic et al. 2023 für BIMstocks. Die Plattform Madaster wurde durch praktische Anwendung im Rahmen dieser Diplomarbeit untersucht, wobei ein im Rahmen der Lehrveranstaltung „Bau- und

Planungsmanagement“ (TU Wien) erstelltes BIM-Modell als Quelldatei für die Auswertungen verwendet wurde. Zusätzlich wurden Madaster-Handbücher und Fachartikel als Informationsquelle zum tieferen Verständnis der Funktionen der Plattform herangezogen.

4.3.1. Vorstellung digitaler Materialkataster

M-DAB



Die Plattform M-DAB wurde in Jahren 2020-2021 in Zusammenarbeit der Forscher:innen an der Technischen Universität Wien und externen Expert:innen als Teil des Forschungsprojektes „M-DAB: Materialressourcen der Stadt digitalisieren, analysieren und nachhaltig bewirtschaften“ im Rahmen des Programms „Stadt der Zukunft“ des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) entwickelt.

Ein Projektziel war der Aufbau einer Datenbank, der Plattform M-DAB, die den aktuellen Zustand der materiellen Zusammensetzung des Wiener Gebäudebestandes erfassen soll. Dabei wurden mehrere Datenquellen wie Datensätze früherer Forschungsprojekte, das Open-Data-Angebot sowie die nicht-öffentlichen Datensätze der Magistratsabteilungen der Stadt Wien herangezogen, um die Materialintensitäten der im Rahmen des Projektes definierten Gebäudetypen zu ermitteln und diese auf den gesamten Gebäudebestand hochzurechnen. Darauf aufbauend wurde ein Simulationsmodell erstellt, welches die verschiedenen Szenarien für die Entwicklung des Gebäudebestandes in Bezug auf die dadurch anfallenden Materialmengen analysieren und anhand des Visualisierungsmoduls räumlich darstellen lässt.

Die Plattform stellt eine räumlich abgegrenzte flächendeckende Datenbank der Materialressourcen des Wiener Gebäudebestandes dar und bildet nicht nur den Ist-Zustand der Materialmengen des Gebäudebestandes ab, sondern erlaubt es, unterschiedliche Zukunftsszenarien zu simulieren und deren Auswirkungen auf den Gebäudebestand und die Materialressourcen der Stadt zu analysieren (Bindreiter et al., 2022: S. 13-14). Der Datensatz der Plattform bildet daher eine „Grundlage für die Bewertung und Optimierung des Baurestmassenmanagements in Wien und in Städten mit vergleichbarem Gebäudebestand“ und sollte insbesondere die Identifizierung der entsprechenden Optimierungsmaßnahmen unterstützen. (Bindreiter et al., 2022: S. 63).

BIMstocks

BIMstocks

Die Plattform BIMstocks ist ein Teil des Forschungsprojektes „Digital Urban Mining Platform: Assessing the material composition of building stocks through coupling of BIM to GIS“, der in Zusammenarbeit der Forscher:innen an der Technischen Universität Wien und externen Expert:innen im Rahmen des Programms „Stadt der Zukunft“ des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) entstanden ist.

Das Ziel der Plattformentwicklung war es, die materielle Zusammensetzung der zehn Bestandgebäude, welche die typischen Wiener Gebäudetypen darstellen, als detaillierte As-Built BIM-Modelle zu erfassen und durch Hochskalierung dieser Daten auf den gesamten Gebäudebestand die Materialpotenziale auf der Stadtebene zu ermitteln. Darauf aufbauend wurde eine Gebäudebewertungssystematik entwickelt, die eine Evaluierung der Recyclingpotenziale des Gebäudes anhand der Analyse der darin verbauten Materialien ermöglicht.

Im Projekt wurde eine breite Palette von Datenquellen und Methoden für die Erstellung der Plattform angewendet. Insbesondere wurden die Daten der 3D-Vermessung, der Ground-Penetrating-Radar-Scans, die Ergebnisse der Analyse durch Machine-Learning-Algorithmen für die Datenerhebung sowie das GIS-Modell der Stadt Wien für Visualisierung des Datensatzes der Plattform verwendet.

Das Kernziel des Projektes war die Entwicklung einer konsistenten digitalen Datengrundlage, die nicht nur den Ist-Zustand der Materialmengen abbildet, sondern auch das Recyclingpotential des Gebäudebestandes und die dadurch anfallenden Materialmengen vorhersagen kann (*Honic et al., 2023*).

Madaster



Die Plattform Madaster wurde 2017 vom Architekten Thomas M. Rau und dem Berater Pablo van der Bosch in den Niederlanden als Online-Plattform für die Erfassung von Materialien und Bauteilen in Gebäuden und Infrastrukturen gegründet (*Madaster, 2022*). Sie erhielt Fördermittel aus dem EU-Programm „Horizon 2020“ (*CORDIS, 2017*) und steht unter der Aufsicht der niederländischen gemeinnützigen Madaster-Stiftung (*Umweltdialog, 2021*). In den darauffolgenden Jahren wurde die Plattform durch Kooperationen mit lokalen Akteuren in weiteren Ländern wie Norwegen, Schweiz, Deutschland, Belgien und auch in Österreich eingeführt.

Die Vision der Plattform besteht in einem europaweiten Materialkataster des Gebäudebestandes, der in den städtischen Gebäudebeständen potenziell vorhandene Materialien für zukünftige Bauprojekte „*sichtbar zu machen und nutzbar zu halten*“ (Bergmann, 2022).

Madaster fungiert als eine kommerzielle Cloud-basierte Plattform zur Erfassung der Gebäude und Infrastrukturobjekte ohne Bezug zu bestimmten administrativen oder geografischen Grenzen. Die Plattform stellt ein Instrument zur Dokumentation und Bewertung der Immobilien hinsichtlich Kriterien der Kreislaufwirtschaft und Nachhaltigkeit. Insbesondere bietet ermöglicht die Plattform die Materialien der Bauwerke zu systematisch zu erfassen, darauf aufbauend die einzelnen Immobilien oder Gruppen (wie beispielsweise Immobilienportfolios) anhand verschiedener Indikatoren wie Zirkularität, CO₂-Gehalt, Materialrestwert u.a. zu bewerten, sowie die Daten für eine benutzerdefinierte Region zu aggregieren.

4.3.2. Erhebung der Information (*information gathering*)

M-DAB

Der Fokus der Datenerhebung für die Plattform M-DAB lag auf der Erfassung der materiellen Zusammensetzung des kompletten Wiener Gebäudebestandes. Die erhobenen Daten beziehen sich daher ausschließlich auf die Gebäude und Grundstücke innerhalb Wiener Verwaltungsgrenzen.

Die Datenbeschaffung erfolgte dabei anhand der Bottom-Up-Methode (vgl. Kapitel 3.3.4) durch Kombination mehrerer Datensätze aus verschiedenen Quellen, welche sowohl digitale GIS-Daten zu verschiedenen Eigenschaften der Gebäude als auch analoge Dokumente wie Bestandspläne umfassen. Die Rohdaten wurden aus den folgenden Quellen erhoben (Bindreiter et al., 2022: S. 22, S. 80-81):

- Open Government Data der Stadt Wien wie das digitale Gebäudemodell aus der Flächenmehrzweckkarte (MA41), Baublöcke (MA21), Bauperioden (MA19), Bezirks- und Zahlbezirksgrenzen (MA41) sowie Realnutzungskartierung (MA18)
- Denkmalliste des Bundesdenkmalamtes zur Information über den Denkmalschutzstatus der Gebäude
- ergänzende nicht-öffentliche Datensätze der Stadt Wien wie generalisierte Flächenwidmung mit Bauklassenabgrenzung, besondere Bestimmungen, Höhen und bebaubare Flächen als Flächenbestand, jeweils als Flächenbestand (alle Daten MA21), Auszüge zu Bauanzeigen zur Information über Dachgeschoßaufbauten und Sanierungen seit 2005 (MA37), digitale Katastermappe als Grundstückspolygone (MA41), Gebäudealter (MA19)

- Gebäudeinformationen zu Bauwerken der Baujahren vor 1919, sowie von 1919 bis 1945 aus dem Forschungsprojekt WWTF Projekt TransLoC des Christian-Doppler-Labors der TU Wien
- Analoge Bestandspläne der in Stichproben ausgewählten Gebäude verschiedener Nutzungskategorien
- Google-Street-View der im Rahmen der Stichproben ausgewählten Gebäude
- Als eine mögliche Erweiterung der Datenquellen werden im Projekt M-DAB die BIM-Modelle betrachtet, die jedoch optimalerweise nicht den geplanten, sondern den gebauten Zustand des Bauwerks abbilden sollten. In diesem Zusammenhang wurden BIM-Modelle im IFC-Austauschformat im Rahmen des Projektes zur Definition der Anforderungen an BIM untersucht, jedoch nicht direkt für die Erstellung des Datensatzes der Plattform verwendet

Für die Ermittlung der Materialzusammensetzung des Wiener Gebäudebestandes wurde eine repräsentative Stichprobe von 256 Gebäuden ausgewählt. Diese Stichprobe basiert auf einer Grundgesamtheit von rund 230.000 Gebäuden, die im dreidimensionalen digitalen Gebäudemodell der Stadt Wien (DGM, erstellt durch MA 41) erfasst sind und nach Kriterien wie Bauperiode, Nutzung und Brutto-Rauminhalt in 72 Kategorien eingeteilt wurden. Die Detailanalyse der ausgewählten Gebäude umfasste die Auswertung von Bestandsplänen und anschließende Validierung anhand weiterer Datenquellen wie Luftbildern und Google-Street-View, um die Materialintensität beeinflussende Merkmale wie Dachgeschoßaufbauten oder thermische Sanierungen festzustellen. Des Weiteren wurden die Materialintensitäten für Beton, Ziegel, Eisen und Stahl, Sand, Kies, Stein, Holz, Mineralwolle, Polystyrol, Glas und Gipskartonplatten in t/m³ Brutto-Rauminhalt in den Gebäuden aus der Stichprobe ermittelt und über deren Gebäudekategorien auf den gesamten Gebäudebestand hochskaliert. Die Hochrechnung erfolgte durch die Multiplikation der Materialintensitäten der jeweiligen Gebäudekategorien mit dem Brutto-Rauminhalt der dazugehörigen Gebäude (*Bindreiter et al., 2022: S. 22; Lederer, 2021*).

Ein weiteres Datenset, der im Rahmen der Datenerhebung erstellt wurde, dient als Grundlage für das Simulationsmodell der Plattform, welche die Materialströme in verschiedenen Stadtentwicklungsszenarien prognostizieren lässt. Dafür wurden die Daten zum Denkmalschutz, Flächen- und Gebäudenutzung, Bebauungsplanbestimmungen sowie Bauanzeigen der Dachgeschoßaufbauten in einem Datensatz kombiniert. In einem datenanalytischen Verfahren wurden daraus die Bau- und Geschoßflächenpotenziale zur nachverdichtenden Bebauung sowie die Wahrscheinlichkeit des Gebäudeabrisses („Abrissvulnerabilität“) errechnet, den Gebäuden sowie Grundstücken zugeordnet und mit dem Grunddatensatz zusammengeführt (*Bindreiter et al., 2022: S. 26-34*).

BIMstocks

Analog zu M-DAB zielte das Datenerhebungsverfahren des Projektes BIMstocks darauf ab, eine Plattform mit einem vollständigen Datensatz zur materiellen Zusammensetzung des Wiener Gebäudebestandes zu erstellen. Dabei wurden die Mengen der darin verbauten Materialien durch Zusammenführung verschiedener Datenquellen erfasst. Der räumliche Fokus der Plattform liegt auf der Stadt Wien und daher nur Gebäude innerhalb der Verwaltungsgrenzen der Stadt Wien beinhaltet.

Die Methode der Datenerhebung folgte einem Bottom-Up-Ansatz, basierend auf einer Stichprobe von 10 typischen Bestandsgebäuden, die im Projekt als „Use Cases“ oder „Archetypen“ bezeichnet werden. Diese repräsentieren die Gebäuden verschiedener Bauperioden und Gebäudemassen und sollten dadurch die Gebäudetypologie des gesamten Wiener Gebäudebestandes abdecken (*Honic et al., 2023: S. 25*).

Die materielle Zusammensetzung der „Use Cases“ wurde durch invasive, wie Aufstemmen und Bohren verschiedener Bauteile, sowie durch nicht-invasiven Methoden, wie der Ground Penetrating Radar (GPR), Laser Scans, Auswertung der Bestandspläne und Fotodokumentation, erhoben. Die Funktion des Ground Penetrating Radars basiert auf dem Abstrahlen elektromagnetischer Wellen, die an den Grenzflächen zwischen verschiedenen Materialien reflektiert werden. Die Analyse der reflektierten Signale ermöglicht Rückschlüsse auf Materialschichten, insbesondere deren Dichte und Dicke. Anschließend wurden die durch GPR-Scans erhobenen Daten anhand der Machine-Learning-Algorithmen ausgewertet, um die Zusammensetzung und Stärken der Materialschichten von Bauteilen automatisch zu erkennen oder vorherzusagen. Die Laser Scans dienten der Erfassung der Gebäudegeometrie zur Ergänzung oder Aktualisierung der Informationen aus den Bestandsplänen.

Auf Basis der im Rahmen der Gebäudeuntersuchungen sowie der Analyse der Bestandsdokumentation gesammelten Daten wurden für jeden „Use Case“ die Aufbautenlisten der vorhandenen Bauteile, insbesondere deren Materialschichten inklusive Schichtstärken, erstellt. Aus den Aufbautenlisten wurden systematisierte BIM-Objektkataloge als Grundlage für die BIM-Modellierung der „Use Cases“ abgeleitet. BIM-Modelle der „Use Cases“ stellen somit eine digitale Rekonstruktion der Gebäudestrukturen auf Basis der spezifischen Bauelemente und Materialien aus den BIM-Objektkatalogen dar.

Anhand der BIM-Modelle der Use Cases wurden die Materialintensitäten für Keller-, Ober- und Dachgeschoße in kg/m^3 Brutto-Rauminhalt berechnet. Die ermittelten Kennwerte wurden anschließend mit den Brutto-Rauminhalten weiterer Gebäude derselben Nutzung und Bauperiode multipliziert, um die Materialmengen auf den gesamten Gebäudebestand Wiens hochzurechnen. Als Grundlage für die Hochrechnung, bzw. für die Ermittlung der Brutto-Rauminhalte sowie für die

Verortung der Gebäude wurde das dreidimensionale Modell der Stadt Wien in LOD 2.1 (MA41) verwendet.

Somit enthält die Plattform enthält die aggregierten Informationen über die Ist-Mengen der in Bauwerken verbauten Materialien, die nach Zugehörigkeit zu Geschoßen sowie Materialgruppen wie Ziegel, Mörtel, Beton, Putz, Naturstein u.a strukturiert werden.

Madaster

Die Plattform Madaster ermöglicht den Plattformnutzer:innen ihre eigenen, von ihnen geplanten oder verwalteten, Objekte über die Benutzeroberfläche in die Datenbank einzutragen. Der Umfang der auf Madaster erfassten Daten hängt daher von hochgeladenen Daten der Plattformnutzer:innen ab. Als Datenquellen fungieren dabei BIM-Modelle der Objekte oder, wenn kein BIM-Modell vorhanden ist, eine von Madaster entwickelte Excel-Vorlage, die Erstellung eines strukturierten Materialinventars des Gebäudes ermöglicht. Hierbei besteht die Möglichkeit mehrere Quelldateien hochzuladen und dazwischen wechseln, wodurch die Auswertung und Vergleich verschiedener Gebäudeprojektvarianten hinsichtlich Bewertungsparameter (vgl. *Kapitel 4.3.6, 4.3.7*) möglich wird. Darüber hinaus können über das Plattforminterface die Gebäudedaten wie Baujahr, Nutzung, Planungsphase, geplante Lebenszyklusdauer, Bruttogeschoßfläche manuell eingegeben werden. Durch manuelle Angabe der Projektadresse erfolgt die Georeferenzierung des Gebäudes.

Die BIM-Modelle sollen nach bestimmten Modellierungsrichtlinien von BuildingSmart⁹ sowie nach Vorgaben von Madaster erstellt und strukturiert werden, um das teilautomatisierte Verknüpfung der modellierten Bauteile mit den Materialien zu ermöglichen.

Die Struktur der Excel-Tabellen orientiert sich auf dem Schichtenmodell von Steward Brand (s. *Kapitel 3.2.2*), wobei die Bauteilinformationen den Schichten wie Umgebung, Baukonstruktionen, Fassade, Technische Anlagen, Innenausbau und Mobiliar zugeordnet werden können. Die Tabelle kann die Informationen zu Materialien, Verortung im Gebäude, Massen und Mengen der Bauteile enthalten und somit das Gebäude effektiv in einer tabellarischen Form abbilden.

Für die Anreicherung der Materialdaten mit weiteren, für die Gebäudebewertung relevanten, Eigenschaften verfügt Madaster über verschiedene Datenbanken der generischen oder herstellerspezifischen Baumaterialien, welche die Bauteile der BIM-Modelle oder Excel-Tabellen mit den Baustoffen und deren Informationen (Gewicht, enthaltener CO₂ u.a) aus diesen Datenbanken automatisch oder manuell verknüpfen lassen. Dadurch können beispielsweise die im

⁹ buildingSMART (<https://www.buildingsmart.org/>) ist eine internationale Organisation, die sich mit der Entwicklung von Standards für die digitale Transformation der Bauindustrie durch Building Information Modeling (BIM) beschäftigt

IFC-Modell allgemein genannten Materialien wie „Mineralwolle“ oder „Holz „mit den Daten der konkreten Produkte angereichert werden. Darüber hinaus können im Madaster die Bauteildaten mit den Angaben zur Demontierbarkeit, Materialherkunft, Recyclebarkeit und Umbauphasen ergänzt werden.

4.3.3. Speichern und Abrufen der Information (*information storage and retrieval*)

Die Funktion des **Speicherns und des Abrufens** der Information bezieht sich auf die Speicherung der erhobenen Daten, sowie auf ermöglicht den Plattformnutzer:innen diese Daten sowie die Ergebnisse deren Auswertung abzurufen.

Die Plattformen M-DAB, BIMstocks und Madaster stellen webbasierte Datenbanken dar, wobei die Informationen zu den Materialien, deren Mengen und Standorten über eine interaktive GIS-gestützte Benutzeroberfläche erhoben werden können.

Madaster regelt den Zugriff auf die Plattform über die Accounts, *„in der Regel der Eigentümer der Immobilie oder die primäre, führende Partei in einer bestimmten Phase (z. B. der Architekt in der Entwurfsphase, der Bauunternehmer in der Ausführungsphase oder ein designierter Gebäudemanager in der Nutzungsphase)“* (Madaster, 2021: S. 6). Dadurch ist Zugang nur zu den Daten möglich, für die ein/e Benutzer:in berechtigt ist. Ein Benutzerkonto kann mehrere Datensätze zu jeweiligen Gebäuden beinhalten. Innerhalb eines Datensatzes können die Gebäudedaten hochgeladen, verwaltet und aktualisiert werden. Hierbei ermöglicht Madaster mehrere Modelle des Gebäudes zu speichern, was insbesondere die vergleichende Bewertung der Planungsvarianten anhand der Madaster Bewertungsfunktionen (vgl. Kapitel 4.3.6) ermöglicht. Neben den Quelldateien der Gebäude können auch zusätzliche Dokumentationen hinzugefügt werden. Ein Gebäudedatensatz bildet somit einen Speicherort für Modelle, Gebäudedokumentationen sowie für die Auswertungen in Form von PDF-Berichten, die im Rahmen der kreislauforientierten Planung, des Betriebs und des Rückbaus relevant sein können.

M-DAB und BIMstocks bieten hingegen Zugang und umfassen die Daten vom kompletten Gebäudebestand. Beide Plattformen werden dabei über eine zentrale Schnittstelle verwaltet, wobei auf den kompletten Datensatz zugegriffen werden kann. Darüber hinaus speichert M-DAB zusätzlich die vorbereiteten Grunddaten für das Simulationsmodell (vgl. Kapitel 4.3.7; Bindreiter et al., 2022, S. 32). Diese Daten gehören zwar zum gesamten Datensatz der Plattform, werden aber nur im Simulationsprozess verwendet.

Die grundlegende räumliche Dateneinheit der Plattformen stellt ein Gebäude dar. Die im jeweiligen Gebäude verbauten Materialien und deren Mengen werden auf den Plattformen nach Materialgruppen (vgl. Tabelle 1) als Massen in Tonnen pro m³ Brutto-Rauminhalt (M-DAB), Kilogramm pro Gebäude oder pro Geschoß (BIMstocks), und Tonnen pro Gebäude oder alternativ in

Kilogramm pro m² Brutto-Grundfläche (Madaster) ausgedruckt. Die Plattform BIMstocks lässt die Materialmengen in Gebäuden nach Geschoßen aufteilen, wobei nach den Keller-, Dach- und Obergeschoßen (inklusive Erdgeschoß) gegliedert wird. Eine noch präzisere Aufteilung bietet die Plattform Madaster an, wobei die Materialien nach Kategorien sowohl für das ganze Gebäude als auch für jeden einzelnen Geschoß ermittelt werden können. Darüber hinaus ermöglicht Madaster die Erhebung der Daten auf der Bauteilebene, insbesondere der Daten über die in Bauteilen verwendeten Bauprodukten und deren Verbindungen.

Neben den Materialdaten lassen die Plattformen auch die relevanten Gebäudeinformationen erheben, wie beispielsweise Nutzung, Bauperiode oder Bruttogeschoßfläche.

Die Plattformen ermöglichen die Erhebung der Materialmengen sowohl in jedem einzelnen Gebäude als auch auf einer definierten Aggregationsebene. Hierbei können die Mengen nach verschiedenen räumlichen Einheiten wie Baublöcke, Bezirke und die gesamte Stadt aggregiert werden, wodurch die Daten zu potenziell vorhandenen Materialressourcen in einem bestimmten Gebiet ermittelt werden können.

Darüber hinaus verfügen die Plattformen über die Daten aus den analytischen Funktionen. So ermöglicht die Plattform M-DAB eine szenarienbasierte Simulation der Stadtentwicklungsszenarien mit verschiedenen Abriss- und Neubauquoten, wodurch eine Prognose zukünftiger Veränderungen der Materialmengen im Gebäudebestand bis auf Baublockebene möglich ist. Damit lässt M-DAB die Mengen der im Gebäudebestand potenziell vorhandenen Materialien für die Jahren bis 2050 prognostizieren und abrufen (*Bindreiter et al., 2022: S. 39-48*).

Tabelle 1 bietet einen vergleichenden Überblick über die beschriebenen Eigenschaften der Plattformen hinsichtlich der verfügbaren Daten, Materialgruppen, Mengeneinheiten und Aggregationsebenen.

Tabelle 1: Übersicht der verfügbaren Daten, Materialgruppen, Einheiten der Materialmengen und Aggregationsebenen der Plattformen M-DAB, BIMstocks und Madaster. Eigene Zusammenfassung nach Bindreiter et al., 2022; Honic et al., 2023; Plattform Madaster

M-DAB	BIMstocks	Madaster
Verfügbare Daten		
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Räumliche Verortung der Gebäude ▪ Materialintensitäten der Gebäude ▪ Ergebnisse der szenarienbasierten Prognosen ▪ Gebäudeinformationen: Bauperiode, Nutzung, Brutto-Rauminhalt 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Räumliche Verortung der Gebäude ▪ Materialintensitäten der Gebäude ▪ Ergebnisse der Bewertung der Recyclingfähigkeit der Gebäude ▪ Gebäudesachdaten: Bauperiode, Nutzung, Brutto-Rauminhalt 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Räumliche Verortung der Gebäude ▪ Materialintensitäten der Gebäude ▪ Gebäudesachdaten: Bauperiode, Nutzung, Brutto-Rauminhalt ▪ Ergebnisse der Bewertung hinsichtlich Kreislauffähigkeit, und Umweltwirkungen des Gebäudes ▪ Finanzieller Restwertes der verbauten Materialien
Materialgruppen		
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Beton und Estrich ▪ Eisen und Stahl ▪ Ziegelmauerwerk (inklusive Mörtel und Putz) ▪ Kies-Sand-Naturstein ▪ Holz ▪ Mineralwolle (ohne Trittschalldämmung) ▪ Polystyrol (ohne Trittschalldämmung) ▪ Gipskartonplatten ▪ Glas 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aluminium ▪ Asphalt ▪ Beton ▪ Bitumen ▪ Blei ▪ Diverse Kunststoffe ▪ Estrich ▪ Faserzement(platten) ▪ Fliesen ▪ Fliesenkleber ▪ Glas ▪ Holzwolke ▪ Holz ▪ Kautschuk ▪ Keramik ▪ Kupfer ▪ Laminat ▪ Linoleum ▪ Mineralfaser ▪ Mineralwolle ▪ Mörtel ▪ Naturstein ▪ Putz ▪ PVC ▪ Gipskarton ▪ Schüttung ▪ Stahl ▪ Stroh ▪ Styropor ▪ Teppich ▪ Terrazzo ▪ Porenbeton ▪ Ziegel 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Naturstein ▪ Beton ▪ Ton ▪ Metall ▪ Holz ▪ organische Materialien ▪ anorganische Materialien ▪ Kunststoffe, Kautschuk ▪ Glas ▪ Füllstoffe ▪ Kalk, Zement, Bindemittel und Mörtel ▪ Ton, Gips, Magnesium und plastische Bindemittel ▪ Verbindungselemente, Fugenfüller ▪ Schutz- und Eigentumsbeeinflussende Materialien ▪ Hilfsstoffe ▪ Verbundwerkstoffe ▪ Sonstige

Einheiten der Materialmengen		
t/m ³ BRI	kg/Gebäude	t/Gebäude oder kg/m ² BGF
Aggregationsebenen		
von Gebäude bis → Baublock → Bezirk → Stadt	von Gebäude bis → Stadt	von Gebäude bis → beliebige räumliche Region

4.3.4. Visualisierung der Information (*information visualization*)

Die Funktion der **Visualisierung der Information** dient im Kontext des Materialkatasters der Darstellung der erfassten Gebäudedaten bzw. der räumlichen Verortung der Objekte und deren Materialressourcen in der Stadt. Sie ermöglicht außerdem eine grafische Abbildung der auf den Katasterdaten aufbauenden Analyse- und Simulationsergebnisse in einer interpretierbaren und interaktiven Form.

Die Plattformen M-DAB, BIMstocks und Madaster bieten verschiedene räumliche Visualisierungsmethoden, die hauptsächlich durch Datenauflösung und Aggregationsstufen definiert sind. So ermöglicht die Plattform M-DAB die Darstellung der Simulationsergebnisse auf der Baublock-, Bezirk- oder Stadtebene (*Bindreiter et al., 2022: S. 29*). Die Plattform BIMstocks erlaubt eine räumliche Visualisierung der Daten sowohl auf der Gebäude- als auch auf der Stadtebene (*Honic et al., 2023, S. 47-48*). Die Plattform Madaster ermöglicht die Zusammenfassung der Daten sowohl auf der Gebäude- als auch auf einer benutzerdefinierten Ebene (Abbildung 44).

Als räumliche Visualisierungsgrundlage nutzen die Plattformen M-DAB und BIMstocks das web- und Javascript-basierte Kartenframework Cesium (*Bindreiter et al., 2022: S. 27; Honic et al., 2023: S. 47-48*), um Daten des Ist-Zustandes sowie die Simulationsergebnisse auf Karten mit 3D-Diagrammen und Tabellen abzubilden. So lassen sich Materialmengen und deren Verhältnisse sowohl im Ist-Zustand als auch in simulierten Soll-Zuständen räumlich darstellen (Abbildung 43). Madaster hingegen verwendet die OpenStreetMap mit Leaflet-Erweiterung zur Georeferenzierung der Objekte, sowie zur grafischen Definition von Regionen zwecks Datenaggregation. Räumlich dargestellt werden dabei jedoch nur die Standorte und die Regionsgrenzen, die aggregierten Daten werden nebenbei als Infografiken abgebildet (Abbildung 44).

Auf der Gebäudeebene verfügt Madaster über die Möglichkeit die IFC-Modelle der Gebäude zu visualisieren und die Information über die einzelnen Bauteile abzurufen (Abbildung 42).

Zusätzlich zu räumlichen Visualisierungen bieten die Plattformen M-DAB und Madaster auch die 2D-Diagramme zur Darstellung der Bestands- und der Simulationsdaten. Diese umfassen statistische Ansichten innerhalb der Simulationsvisualisierung (M-DAB) sowie die Abbildung von Analyse- und Prognosedaten bezüglich einzelner oder mehrerer Gebäude (Madaster). Zum Einsatz

kommen dabei Liniendiagramme zur Darstellung von Prognosen, Sankey-Diagramme zur Darstellung von Materialflüssen (Abbildung 45), sowie Säulen-, Balken- und Kreisdiagramme zur Darstellung der Werte verschiedener Indikatoren (Abbildung 46).

Die Plattformen M-DAB und Madaster ermöglichen zudem eine interaktive Anpassung der Visualisierungen bei Daten- oder Parameteränderungen. So erlaubt M-DAB die Konfiguration von Szenarien, sodass deren Ergebnisse nach Änderung verschiedener Parameter wie Bevölkerungsentwicklung, Wohnflächenbedarf oder Abrissrate dynamisch aktualisiert werden: „Damit wird die spielerische Exploration und Simulation („was-wäre-wenn“) unterschiedlicher Materialmischungen im Neubau, von Policies zu Gebäudeabrissen, aber auch die Auswirkungen unterschiedlichen Stadtwachstums und Wohnraumbedarfs ermöglicht“ (Bindreiter et al., 2022: S. 9). Ebenso gestattet Madaster die Neuberechnung von Bewertungsergebnissen bei Änderungen an Materialität des Gebäudes.

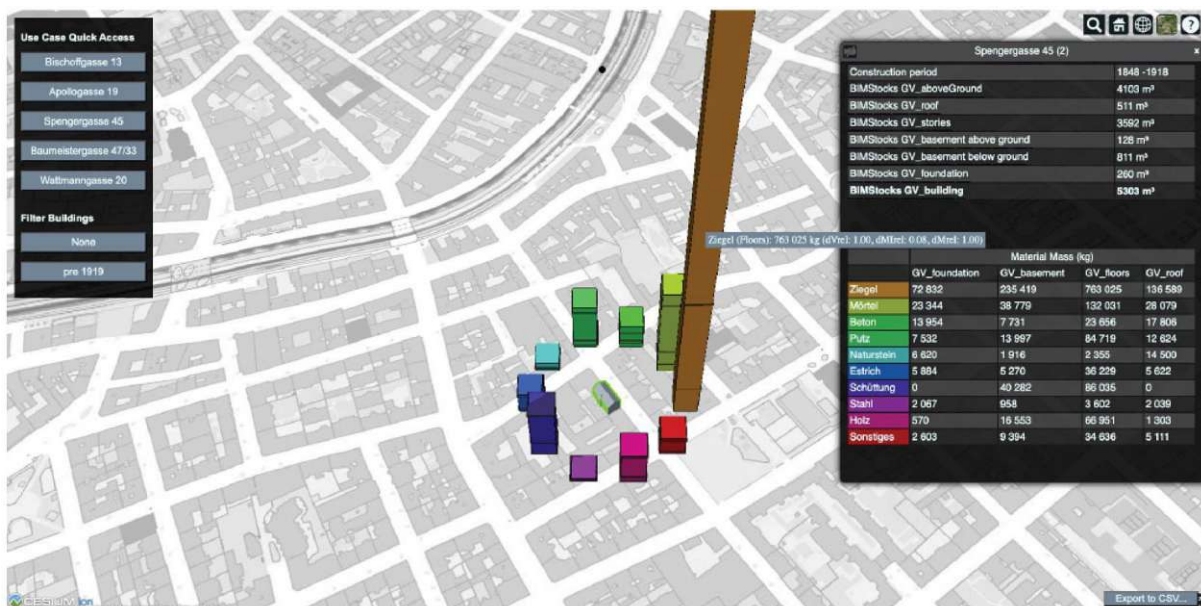


Abbildung 41: Screenshot der Plattform BIMstocks. Dreidimensionale Darstellung des Gebäudes sowie der zugehörigen Materialmengen nach Kategorien und nach Geschossen. Quelle: Honic et al., 2023: S. 48

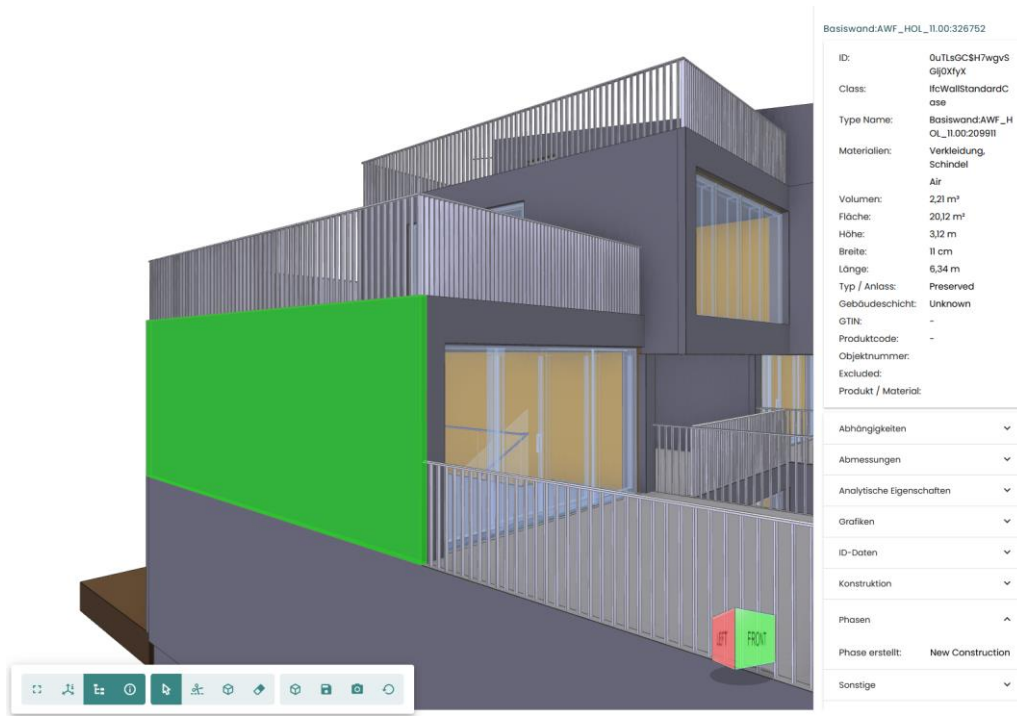


Abbildung 42: Screenshot der Plattform Madaster. Visualisierung des IFC-Modells und der Bauteilinformationen im BIM-Viewer der Plattform Madaster. Eigener Screenshot.

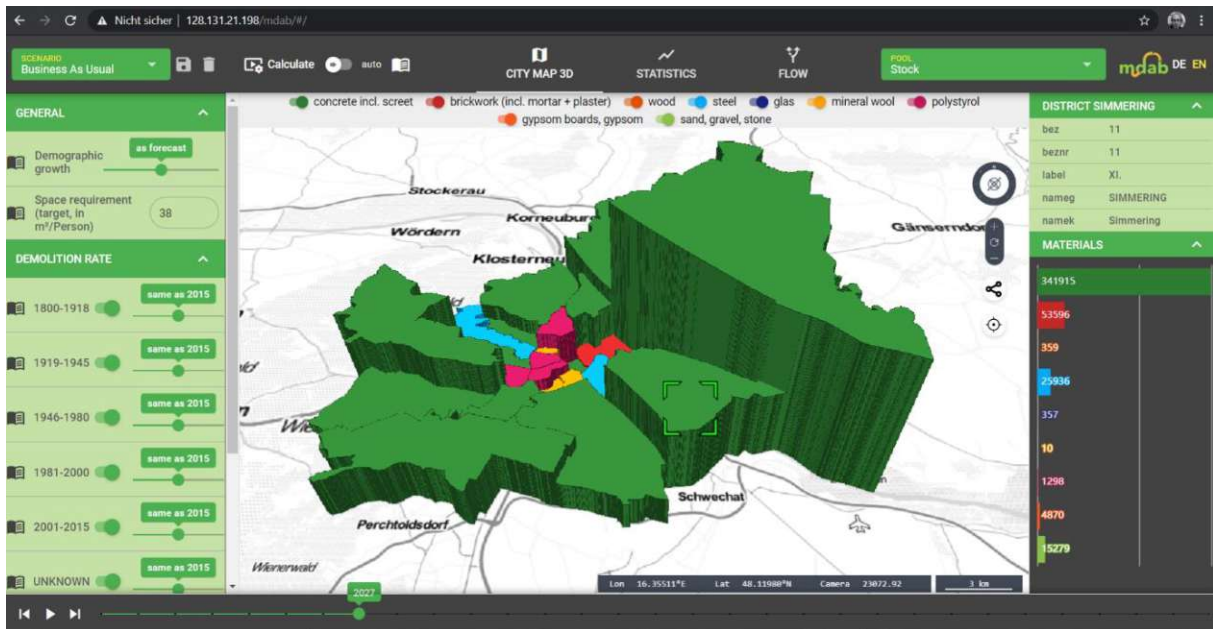


Abbildung 43: Screenshot der Plattform M-DAB. Dreidimensionale Visualisierung der prognostizierten Materialmengen für das Jahr 2027 auf der Stadtebene mit Gliederung nach Bezirken. Quelle: Bindreiter et al., 2022: S. 25

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar. The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

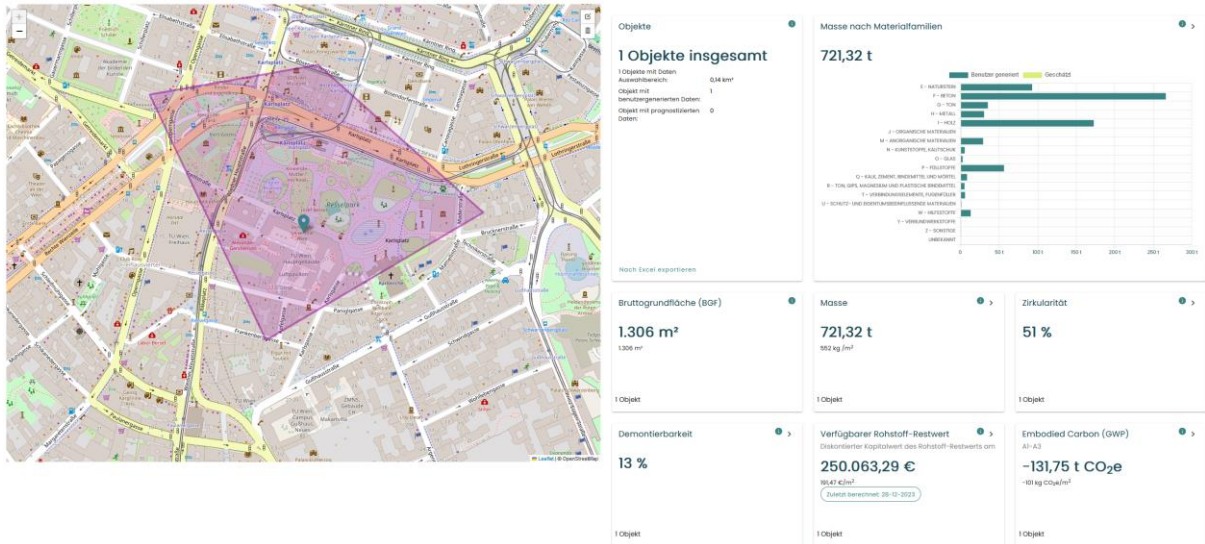


Abbildung 44: Screenshot der Plattform Madaster. Visualisierung des Objektstandortes auf Basis der OSM-Karte. Der Polygon lässt die Daten der sich darin befindenden Objekte aggregieren und die Daten grafisch abzubilden. Eigener Screenshot.

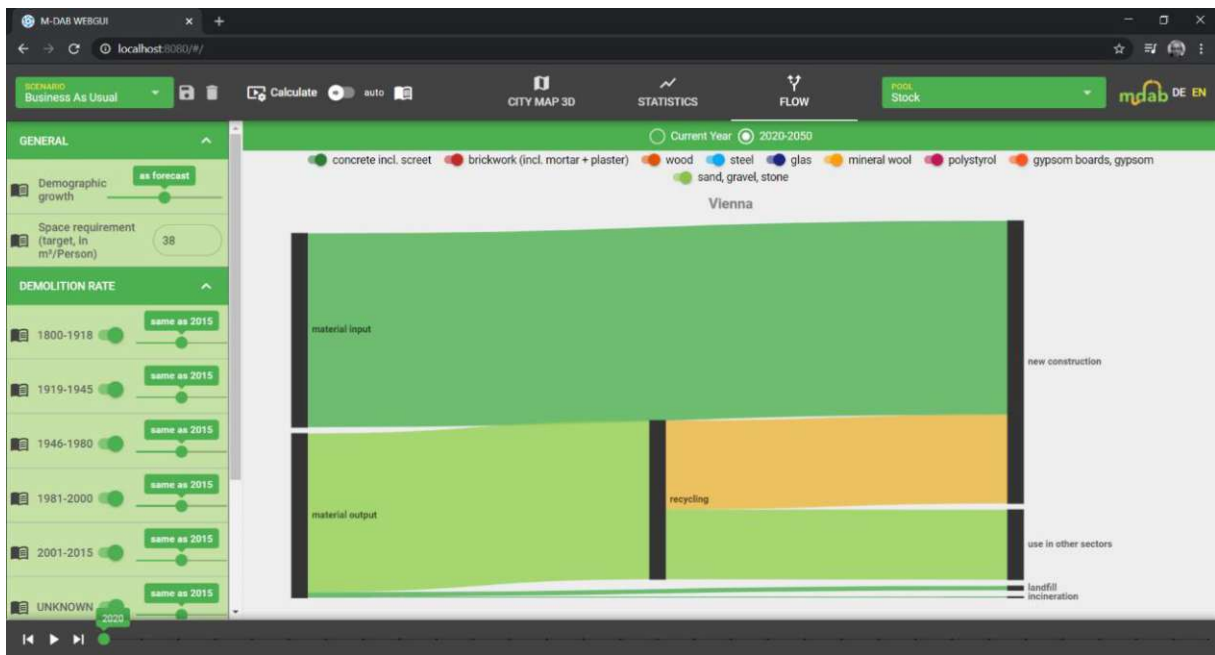


Abbildung 45: Screenshot der Plattform M-DAB. Darstellung der Materialflüsse als Materialinput und Materialoutput für das Jahr 2020 in Form eines Sankey-Diagramms. Quelle: Bindreiter et al., 2022: S. 26

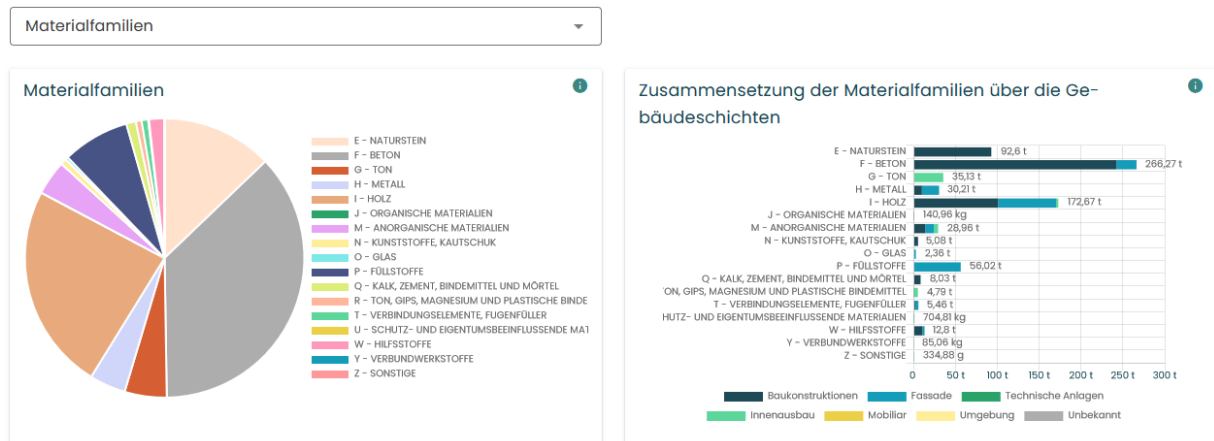


Abbildung 46: Screenshot der Plattform Madaster. Darstellung der materiellen Zusammensetzung des Gebäude und die Zugehörigkeit der Materialfamilien den Gebäudeschichten. Eigener Screenshot.

4.3.5. Kommunikation der Information (*information communication*)

Die Funktion der **Kommunikation der Information** kann im Kontext des Materialkatasters als Unterstützung der Zusammenarbeit zwischen den Akteuren durch Informationsaustausch (Vonk, 2006: S. 29) sowie als Datenaustausch verstanden werden.

Als Gegenstände der Kommunikation können hierbei sowohl die Grunddaten wie Materialien, Mengen und deren räumliche Verortung, als auch Ergebnisse der Analyse und Simulation fungieren. Je nach dem Anwendungsfall sollten diese in einem menschen- bzw. maschinenlesbaren Format wiedergegeben werden.

Die Benutzeroberflächen der Plattformen ermöglichen interaktive Visualisierungen (vgl. Kapitel 4.3.4) sowie den Export relevanter Daten. So bietet BIMstocks beispielsweise einen Export von CSV-Dateien an, die sowohl die Brutto-Raumhalte der Gebäude und ihrer Teile als auch deren materielle Zusammensetzungen und die berechneten Materialmengen enthalten (Honic et al., 2023: S. 47-48).

Eine umfangreiche Funktionalität für den Datenexport in systematisierter Form bietet die Plattform Madaster durch die automatisierte Erstellung von materiellen Gebäudepässen (in der Plattform-Terminologie als „Materialpässe“ bezeichnet) an. Die materiellen Gebäudepässe können je nach Informationsbedarf entweder in einer Kurz- oder Langfassung auf Basis der erfassten und analysierten Gebäudedaten erstellt werden. Ein Gebäudepass enthält detaillierte Informationen wie Sachdaten (wie Adresse, Nutzung, Baujahr, Brutto-Grundfläche u.a.) und Materialdaten (wie Materialien, Mengen, Zugehörigkeit zu Gebäudeschichten u.a.), sowie Daten zur Kreislauffähigkeit, Umweltwirkungen und zum materiellen Restwert (vgl. Kapitel 4.3.6, 4.3.7). Damit können die Gebäudedaten in einer zusammengefassten Form kommuniziert werden, wobei der Detailgrad je nach Informationsanforderungen der Akteure angepasst werden kann.

4.3.6. Analyse der Information (*information analysis*)

Die Aufgabe der Funktion **Analyse der Information** in Planungsunterstützungssystemen besteht darin, neue Informationen aus bestehenden Daten zu generieren (Vonk, 2006: S. 29). Im Rahmen eines Materialkatasters ermöglicht diese Funktion die Bewertung von Bestandsgebäuden sowie des gesamten Gebäudebestandes durch die Auswertung der erfassten Gebäudedaten hinsichtlich bestimmter Kriterien. Diese Funktion lässt sich von „Modellierung der Information“ dadurch abgrenzen, dass bei einer Datenanalyse der Ist-Zustand bewertet wird, jedoch keine Prognosedaten zur möglichen Entwicklung des Bestandes modelliert werden.

Eine gemeinsame analytische Funktion aller drei Plattformen ist die Aggregation und Gliederung der in den Bauteilen der erfassten Gebäude enthaltenen Materialien in definierte Materialgruppen. Zum Beispiel werden Stahlbetonbalken, -stützen und -decken in den erfassten Gebäuden als Massen der Materialgruppen Beton und Stahl umgerechnet. Jede Plattform definiert dabei eigene Gliederungssystematiken (Tabelle 1).

Die Detailgrade der Materialgruppierung auf den Plattformen M-DAB, BIMstocks und Madaster könnten somit unterschiedlichen Analysezielen dienen. Während die eher grobe Gruppierung bei M-DAB für die „*Bewertung und Optimierung des Baurestmassenmanagements*“ verwendet werden kann (Bindreiter et al., 2022: S. 63), könnte die detailliertere Gliederung bei BIMstocks und Madaster insbesondere bei der Rückbauplanung und Bewertung der Recycling-Szenarien von Vorteil sein. Diese unterschiedlichen Ansätze entsprechen den verschiedenen Planungsmaßstäben und erlauben eine Betrachtung der materiellen Zusammensetzung der Gebäude hinsichtlich spezifischer Aufgaben der kreislaufforientierten Planung.

Eine umfassende Funktionalität zur Analyse der Material- und Konstruktionsdaten einzelner Bauwerke bietet die Plattform Madaster an. Dabei wird die Kreislauffähigkeit (*siehe Kapitel 1.7*), oder die „Zirkularität“, der verbauten Materialien und deren Verbindungen bewertet.

Der Indikator besteht aus drei Teilindikatoren für 3 Phasen: Bauphase, Nutzungsphase und Abriss- / Rückbauphase. Für jede Phase wird für jeden Teilindikator der „Zirkularität-Score“ („ZI-Score“) in Bezug auf ein spezifisches Ziel berechnet, wobei der Grad der Zielerreichung dem „ZI-Score“ entspricht. Für die Berechnung des ZI-Score werden verschiedene Parameter der Gebäudematerialien wie Rezyklatgehalt, Wiederverwendungsszenario und Demontierbarkeit mit einbezogen werden, die auf der Plattform bei der Erfassung der Bauteil- und Materialdaten durch Benutzer:innen eingegeben werden können.

Teilindikator „Materialherkunft“ für Bauphase: $CI_{\text{Construction}} = F_U + F_R + F_{RR}$

Summe ($CI_{\text{Construction}}$) der prozentualen Anteile der wiederverwendeten (F_U), schnell erneuerbaren (F_R) und wiederverwerteten (F_{RR}) Materialien am Gesamtgewicht des Bauproduktes (*Heisel & Rau-Oberhuber, 2020: S. 4-5*).

Ziel des Teilindikators: 100-prozentige Verwendung von Sekundärrohstoffen oder von schnell erneuerbaren Materialien (*ebd.*).

Teilindikator „Lebensdauer“ für Nutzungsphase: $CI_{\text{Use}} = L / L_{av}$

Das prozentuale Verhältnis (CI_{Use}) der Länge des potenziellen Lebenszyklus des Bauproduktes (L , in Jahren) zur Länge des branchendurchschnittlichen Funktionslebenszyklus der Gebäudeschicht (L_{av} , in Jahren) (*ebd.*).

Ziel des Teilindikators: Lebenszykluslänge des eingesetzten Bauproduktes länger als der funktionale Lebenszyklus der Gebäudeschicht, in der dieses Produkt verwendet wird (*ebd.*).

Teilindikator „Materialverwertung“ für Abriss- / Rückbauphase: $CI_{\text{End-of-Life}} = C_U + C_R * E_C$

Summe der prozentualen Anteile ($CI_{\text{End-of-Life}}$) der am Ende der Nutzungsdauer wiederverwendbaren (C_U) und der recyclebaren (C_R) Materialien, korrigiert um die Effizienz des Recyclingprozesses (E_C) am Gesamtgewicht des Bauproduktes (*ebd.*).

Ziel des Teilindikators: 100-Prozentige Wiederverwendbarkeit des Bauproduktes am Ende des Lebenszyklus (*ebd.*).

Die ZI-Scores der Teilindikatoren werden für Bauteile berechnet und darauf aufbauend für jede Gebäudeschicht (*siehe Kapitel 3.2.3*) sowie für das ganze Gebäude aggregiert. Die Bauteile, für die keine Daten zum Rezyklatgehalt, zum Anteil der wiederverwertbaren Materialien und der Demontierbarkeit angegeben sind, werden als Korrekturfaktor für unbekanntes Material mitgerechnet (Abbildung 47).

Madaster Zirkularitätsindikator (MZI)

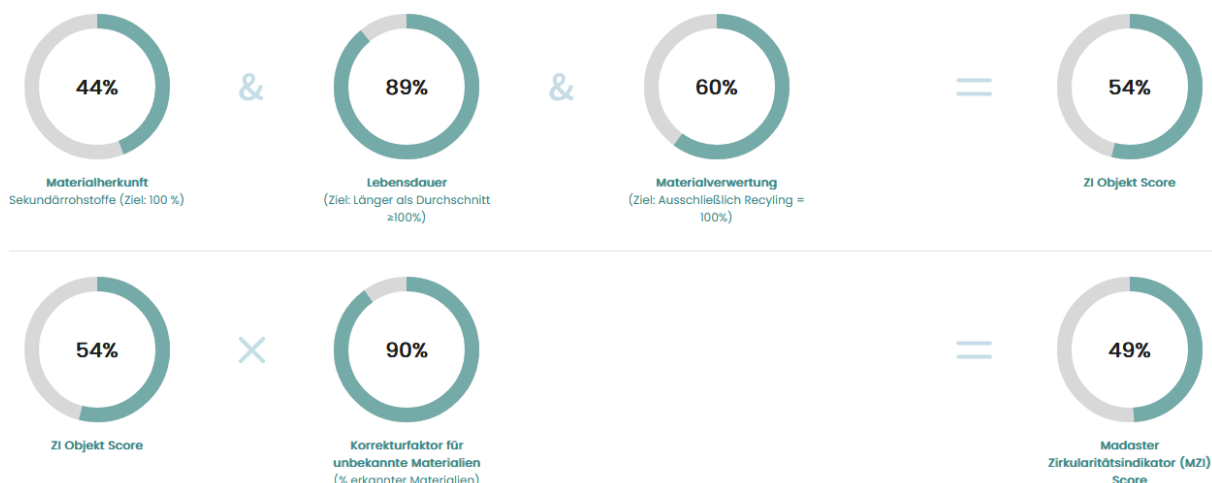


Abbildung 47: Screenshot der Plattform Madaster. Darstellung der Berechnungsergebnisse des Indikators "Zirkularität" für das Beispielprojekt. Eigener Screenshot.

Auf Basis der Angaben zu Rezyklatgehalt, zum Anteil der wiederverwertbaren Materialien sowie zur Demontierbarkeit der Bauteile ermöglicht Madaster die Berechnung der Massen der Materialströme, die in der Bauphase (Teilindikator Materialherkunft) und in der Phase der Abriss-/Rückbauphase (Teilindikator Materialverwertung) entstehen (Abbildung 48). Für die Bauphase werden die im Gebäude verbauten Materialien in Kategorien wie „Wiederverwendet“, „Recycelt“, „Schnell erneuerbare Rohstoffe“, „Nicht schnell erneuerbare Rohstoffe“ und „Nicht erneuerbare Rohstoffe“ eingeteilt, um die Materialien und deren Massen nach Herkunft der Rohstoffe zu gliedern. Für die Abriss-/Rückbauphase werden dieselben Materialien verschiedenen möglichen Behandlungsszenarien zugeordnet. Dabei wird zwischen „Deponierung“, „Verbrennung“, „Verfügbar für das Recycling“ und „Zur Wiederverwendung verfügbar“ unterschieden, um Wieder- und Weiterverwertungspotenzial des Gebäudes zu quantifizieren. Die ermittelten Materialströme werden sowohl aggregiert für das gesamte Gebäude als auch nach Zuordnung zu den Gebäudeschichten oder konkreten Materialien und Produkten grafisch dargestellt (Abbildung 48).

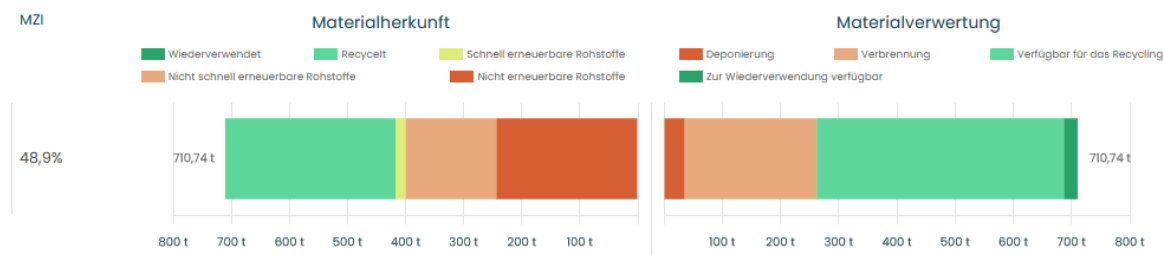


Abbildung 48: Screenshot der Plattform Madaster. Darstellung der Materialströme nach Lebenszyklusphasen des Gebäudes. Eigener Screenshot.

Eine weitere Analysefunktion bietet die Plattform Madaster für die Berechnung der Umweltauswirkungen der materiellen Zusammensetzung des Gebäudes. Dabei werden die Umweltauswirkungen der im Gebäude verbauten Materialien und Bauprodukte anhand der in der Norm DIN EN 15804:2012 „Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte“ definierten Indikatoren bzw. den entsprechenden Berechnungsmodellen ermittelt. Die Indikatoren werden für die jeweiligen Lebenszyklusphasen des Gebäudes lt. DIN EN 15804:2012 berechnet:

Phase A1-A3: Herstellungsphase

Phase A4-A5: Errichtungsphase

Phase B1-B5: Nutzungsphase in Bezug auf Bausubstanz

Phase B6-B7: Nutzungsphase in Bezug auf Gebäudebetrieb

Phase C1-C4: Entsorgungsphase

Phase D: Vorteile und Lasten außerhalb der Systemgrenze, bzw. Wiederverwendungs-, Rückgewinnungs- und/oder Recyclingpotenziale, als Nettoflüsse und Vorteile

Die Indikatoren dienen zur Wirkungsabschätzung von Materialien und Produkten in verschiedenen Wirkungskategorien, wie beispielsweise Klimawandel, Eutrophierung, Wassernutzung und Toxizität, sowie zur Beschreibung des Ressourceneinsatzes, der Abfallkategorien und der Output-Flüsse.

Die Berechnungen der Indikatoren werden ebenso sowohl aggregiert für das gesamte Gebäude als auch spezifisch für einzelne Gebäudeschichten oder Material- und Produktkategorien dargestellt. Die Abbildung 49 und Abbildung 50 stellen die Grafiken mit Berechnungsergebnissen des Indikators Embodied Carbon exemplarisch dar.

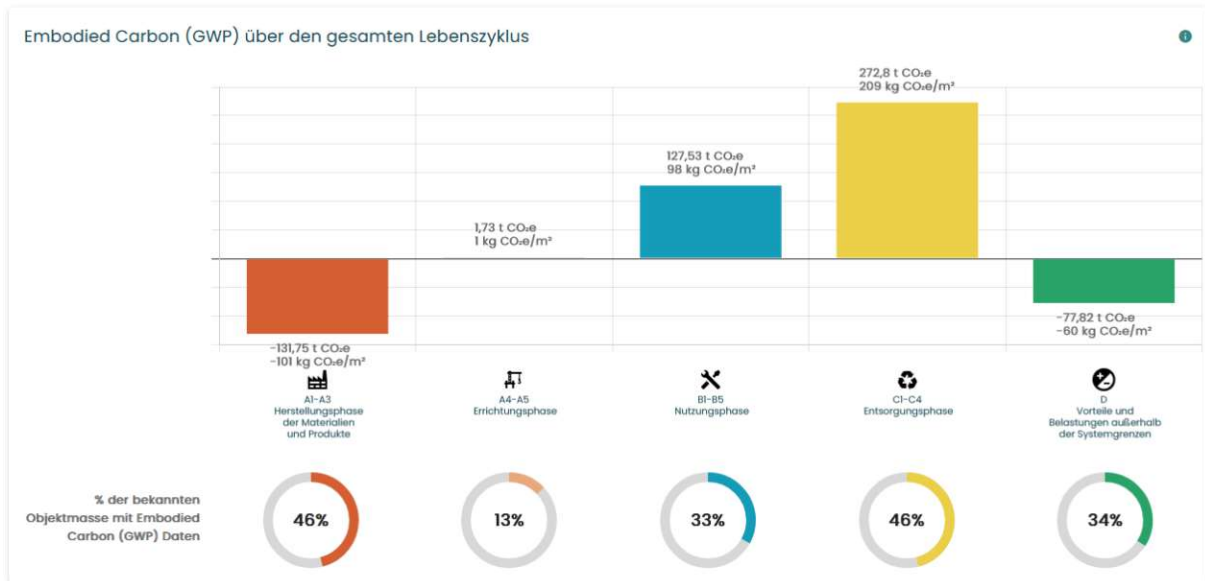


Abbildung 49: Screenshot der Plattform Madaster. Darstellung der Berechnungsergebnisse des Indikators Embodied Carbon für das Beispielprojekt (ganzes Gebäude). Eigener Screenshot.

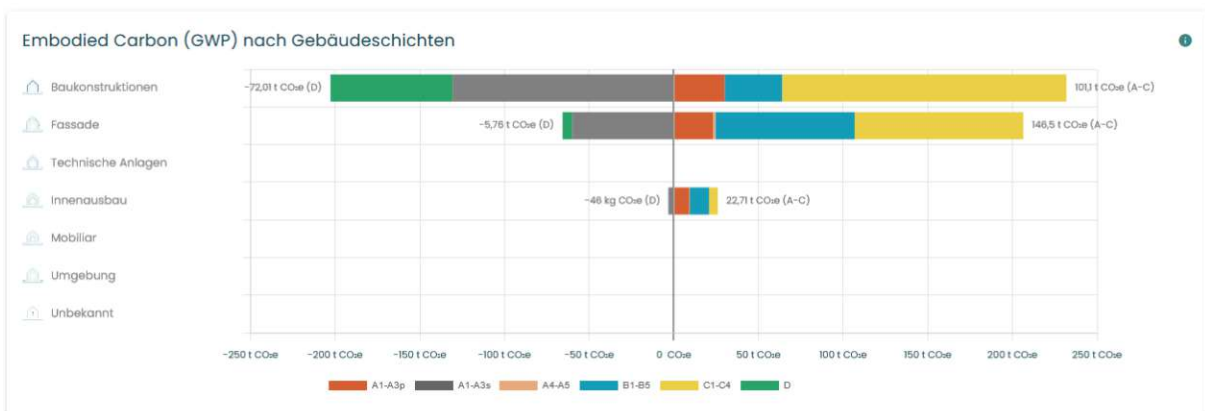


Abbildung 50: Screenshot der Plattform Madaster. Darstellung der Berechnungsergebnisse des Indikators Embodied Carbon für das Beispielprojekt (Berechnungen für Gebäudeschichten). Eigener Screenshot.

Madaster lässt die Indikatoren einzelner Gebäude auf einer räumlichen Ebene aggregieren, wodurch die Bewertung eines nach bestimmten Kriterien abgegrenzten Gebäudebestandes, wie beispielsweise eines Immobilienportfolios, ermöglicht wird (vgl. Kapitel 4.3.4, Abbildung 44).

4.3.7. Modellierung der Information (*information modelling*)

Die Funktion **Modellierung der Information** bei Planungsunterstützungssystemen verwendet die im System vorhandenen Daten für die Simulation der Prozesse bzw. für die Erstellung von Prognosemodellen (Vonk, 2006: S. 29). Bei Materialkatastern können damit die Zukunftsszenarien für Gebäude und Gebäudebestand auf Grundlage der Daten deren materiellen Zusammensetzung

simuliert werden, um dadurch in der Planungsphase die Entscheidungsfindung zu unterstützen sowie die geplanten Maßnahmen gezielt zu entwickeln.

Die Plattform M-DAB verfügt über ein interaktives Simulationsmodell, das die Bauaktivitäten Neubau, Abriss und Ausbau in Bezug auf den Wohnbaubestand der Stadt Wien über die Zeit bis zum Jahr 2050 auf Basis der drei Szenarien modelliert. Die Wohnbauten werden dabei als Materiallager in Form von neun Materialgruppen – Beton, Ziegel, Holz, Stahl, Glas, Mineralwolle, Polystyrol, Gips und Sand – interpretiert und in Tonnen von Material quantifiziert (Bindreiter et al., 2022: S. 24).

Die Grundparameter für die Simulation sind die statistischen Daten zur Bevölkerungsentwicklung Wiens, durchschnittlicher Wohnflächenbedarf pro Bezirk sowie in Tonnen der Materialgruppen ausgedruckte Abbruchrate unter Berücksichtigung der Bauperiode und des Bezirkes. Diese Parameter können im Simulationsmodell gesteuert werden: es können sowohl Ausschlusskriterien wie z.B. Vermeidung des Abrisses einer bestimmten Bauperiode als auch prozentuelle Änderungen der Bevölkerungsentwicklung und Abbruchrate für bestimmte Bezirke festgelegt werden (ebd.: S.24). Das Modell untersucht Bauvolumina, die auf dadurch entstehende Wohnflächennachfrage reagieren können, und berücksichtigt dabei die Bauflächenpotenziale und die „Abrissvulnerabilität“ der Wohngebäude sowie die Grundflächenpotenziale der Grundstücke (ebd.: S. 24).

Die Flächenpotenziale (Abbildung 51) wurden als Bauflächen für Neubauten und Ergänzungsbauten, sowie als Geschossflächenpotenziale für Aufstockung und Dachgeschoßaufbauten auf Basis verschiedener Grundstücks- und Gebäudeinformationen (vgl. Kapitel 4.3.2) analytisch ermittelt. Dabei wurden spezifische Kriterien wie Bauperiode, Sanierungsstand, Traufhöhe, Bauklasse und Grundfläche zur Bestimmung von Potenzialen für Dachgeschoßausbauten und zusätzliche Geschossflächen angewendet. Für Bauflächenpotenziale wurden freie Grundstücksflächen analysiert und mittels eines spezialisierten Algorithmus hinsichtlich ihrer Eignung für Neu- und Ergänzungsbauten bewertet (ebd.: S. 32).

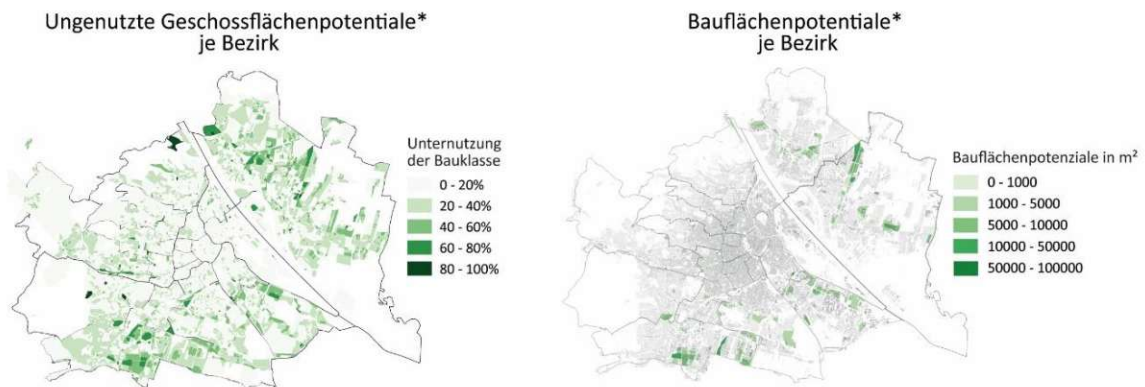


Abbildung 51: Geschoss- und Bauflächenpotenziale (>550 m² Grundfläche) je Baublock in Wien. Quelle: Bindreiter et al., 2022: S. 49

Die Abrissvulnerabilität der Wohngebäude wird durch Faktoren wie Bauperiode, vorangegangene Ausbauten und Denkmalschutz bewertet und auf der Skala von 0 bis 1 festgelegt (Abbildung 52). Denkmalgeschützte, neuere (ab 2001) und kürzlich sanierte Gebäude sowie solche mit ausgebauten Dachgeschoßen wurden vom Abriss ausgeschlossen. Bei den verbleibenden Gebäuden wird der Grad der Ausnutzung der Flächenpotenziale mit der Abrissvulnerabilität in einer umgekehrten Proportionalität verknüpft: Je geringer das Flächenpotenzial ausgenutzt ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit eines Abrisses (*ebd.*: S. 33- 34).



Abbildung 52: Abrissvulnerabilität der Wohngebäude. Quelle: Bindreiter et al., 2022: S. 34

Zusätzlich werden im Modell die Faktoren des vorrangigen Wachstums an der Peripherie, sowie die Materialität der unterschiedlichen Bauformen berücksichtigt. Dabei können der übliche Materialmix für Neubauten und Adaptionen und die nachhaltigeren Bauformen wie Holzbau, sowie Adoptionsrate und Verwendung der recycelten Materialien im Materialmix als Simulationsparameter eingestellt werden (*Bindreiter et al., 2022: S. 24*).

Die Simulationsergebnisse werden als Tonnen von abgebrochenem bzw. neu verbautem Material auf einem 3D-Stadtplan visualisiert und können auf den Ebenen der Baublöcke, der Bezirke, der Zahlbezirke und der gesamten Stadt abgebildet werden (*Bindreiter et al., 2022: S. 24*). Dabei ist es möglich die Parameter über die Benutzeroberfläche anzupassen sowie die Jahre auf der Zeitachse bis 2050 auszuwählen und die Ergebnisse der Simulation dynamisch zu beobachten (Abbildung 53).

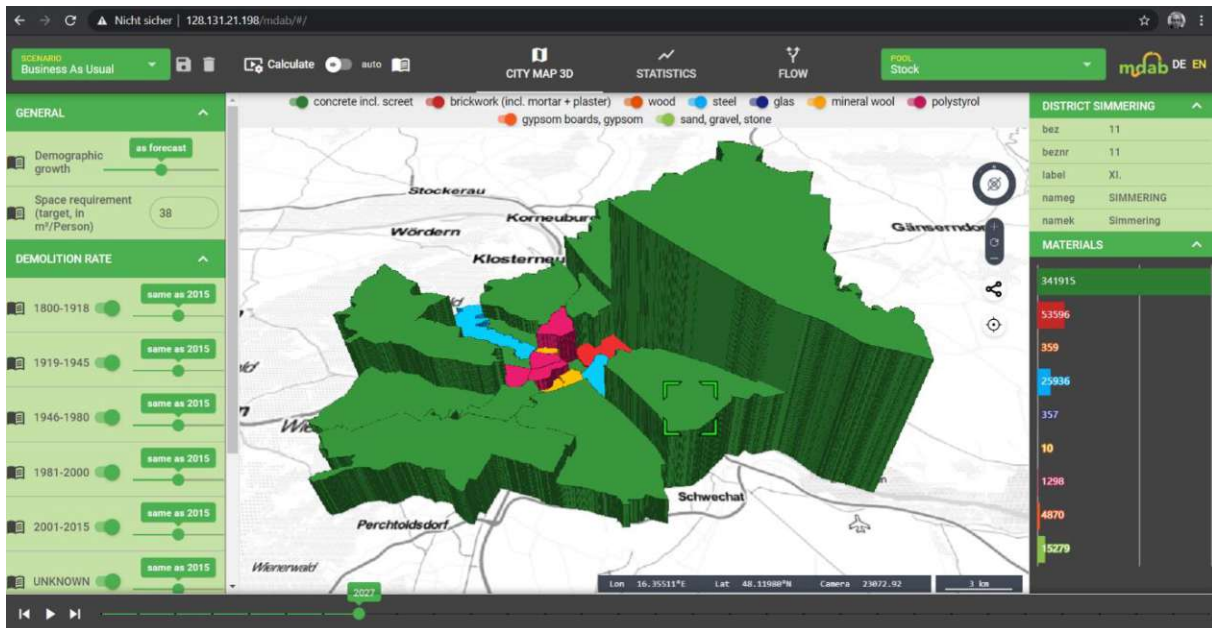


Abbildung 53: Simulationsmodell mit Visualisierungsumgebung der Plattform M-DAB. Quelle: Bindreiter et al., 2022

Das Simulationsmodell ermöglicht somit eine räumliche Darstellung der prognostizierten baulichen Veränderungen ausgedrückt in quantifizierten Materialströmen der definierten Materialgruppen. Diese Modellierung lässt den Gebäudebestand aus der strategischen Perspektive der Material- und Massenströme auf der Stadtebene betrachten, wobei die Daten zur materiellen Zusammensetzung der Bauwerke ein grundlegendes Element darstellen.

Die Plattform Madaster bietet die Funktion zur Modellierung des finanziellen Wertes eines Gebäudes über dessen Lebensdauer. Dabei wird der Indikator „Diskontierter Kapitalwert des Rohstoff-Restwertes“ berechnet, der den potenziellen Wert der Materialien repräsentiert, der am Ende der Lebensdauer der verschiedenen Gebäudeschichten erzielt werden könnte, ohne den Wert des Grundstücks zu berücksichtigen (Madaster, 2024).

Die Modellierung dieses Wertes erfolgt durch die Annahme der funktionalen Lebensdauer der verschiedenen Gebäudeschichten (siehe Kapitel 3.2.2) und somit der dazugehörigen Materialien. Der Wert des jeweiligen Materials am Ende der Nutzungsdauer wird dann auf den aktuellen Wert zurückgerechnet, indem der zukünftige Wert mit dem Diskontsatz auf den gegenwärtigen Zeitpunkt abgezinst wird (ebd.).

Für die Modellierung dieses Wertes werden historische Rohstoffpreise verwendet, die zunächst um Inflation und ggf. Währungskurse korrigiert werden. Diese angepassten Datenpunkte dienen als Basis für eine Regressionsanalyse, welche eine lineare Trendlinie für die Prognose der Rohstoffpreisentwicklung liefert. Auf dieser Grundlage werden die zu erwartenden Werte der Materialien in einem zukünftigen Jahr berechnet. Als Korrekturfaktoren werden dabei die Rückbau-

und Aufbereitungskosten, Materialmengen und Transportkosten sowie die Variablen wie Inflation, Diskontsatz und Baukostenindex in die Berechnung mit einbezogen (ebd.).

Die Berechnungen werden auf einem interaktiven Dashboard dargestellt, wobei durch Verschieben des Reglers entlang der Zeitachse die entsprechenden Werte für das ausgewählte Jahr tabellarisch und grafisch angezeigt werden (Abbildung 54).

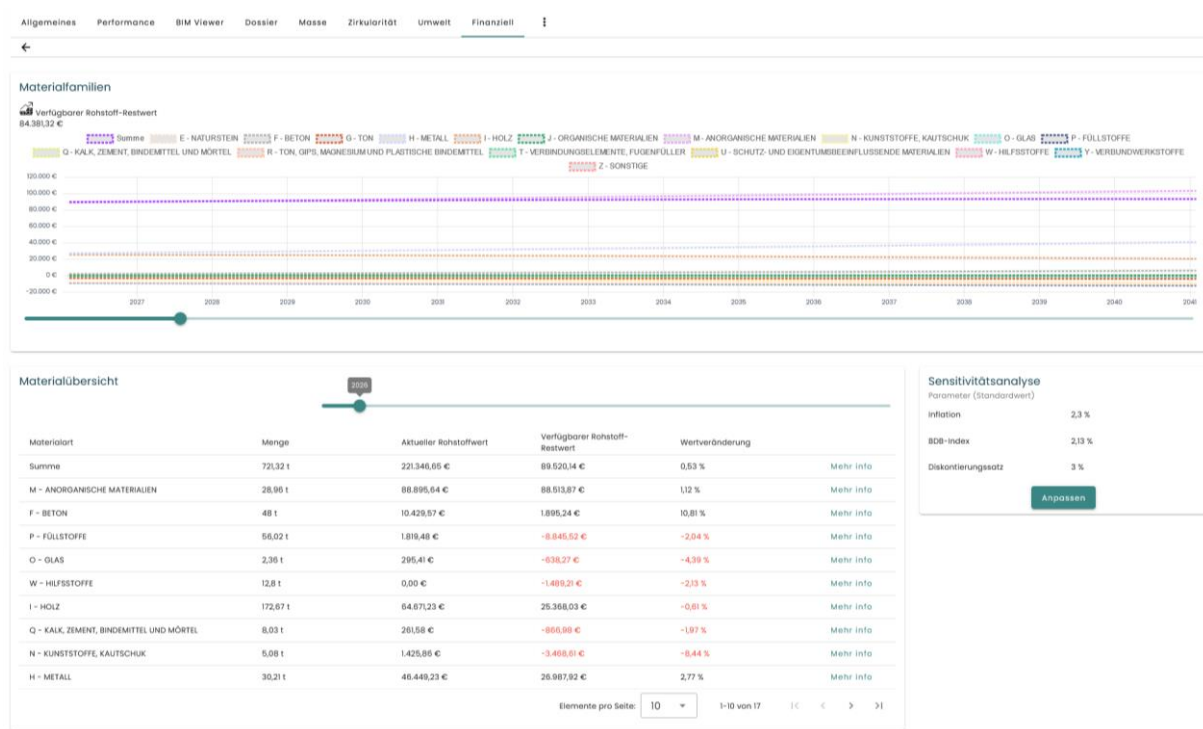


Abbildung 54: Dashboard der Plattform Madaster mit der Darstellung der Materialwerte des Gebäudes. Eigener Screenshot.

Das finanzielle Simulationsmodell der Plattform Madaster ermöglicht eine Einschätzung des finanziellen Wertes von Materialien innerhalb eines Gebäudes, sowohl für den aktuellen Zeitpunkt als auch am Ende der Gebäudelebensdauer. Dies kann als eine finanzielle Bewertungsgrundlage für die Entscheidungsfindung in Bezug auf den Erhalt, die Sanierung oder den Abriss von Gebäuden dienen, sowie die Betrachtung des Gebäudelebenszyklus aus der wirtschaftlichen Perspektive unterstützen.

4.3.8. Schlussfolgerungen der funktionalen Analyse

Die funktionale Analyse der Plattformen M-DAB, BIMstocks und Madaster hat gezeigt, dass diese Plattformen über eine umfassende Funktionalität der Planungsunterstützungssysteme (PSS) verfügen. Die analytischen und die kommunikativen Funktionen von Materialkatastern lassen es nicht nur als eine Datenbank zur Abbildung des Ist-Zustandes der materiellen Zusammensetzung

des Gebäudebestandes, sondern vielmehr als ein komplexes analytisches Tool zur Unterstützung der Planung und Entscheidungsfindung betrachten.

Die analysierten Plattformen verfolgen jeweils ihren eigenen Ansatz bei der Umsetzung der Grundfunktionen von PSS. Im Hinblick auf das Konzept des Materialkatasters als einer Integration der Materialinventare einzelner Bauwerke und regionaler Materialkataster in einem ganzheitlichen Informationsmanagementsystem (vgl. Kapitel 3.3.4), kann die jeweilige Plattform als Illustration eines bestimmten Teilaspektes dieses Konzeptes betrachtet werden.

Die Plattform M-DAB stellt ein Beispiel eines regionalen Materialkatasters dar, der die Betrachtung und Prognostizierung von Materialflüssen auf einer strategischen Ebene ermöglicht. Die M-DAB erfasst den Ist-Zustand der materiellen Zusammensetzung des Wiener Gebäudebestandes durch Typologisierung der Gebäude, Ermittlung von Materialintensitäten der jeweiligen Gebäudetyppvertreter und Hochskalierung der Ergebnisse auf den gesamtstädtischen Gebäudebestand. Auf Grundlage dieses Datensatzes ermöglicht M-DAB parametrisierbare Prognosen der durch Bautätigkeit in Wien entstehenden Materialflüsse. Die M-DAB stellt somit ein Informationstool dar, das auf Basis bereits bestehender Daten auf eine strategische Planung der Materialflüsse in einem entsprechend hochmaßstäblichen Detailgrad ausgelegt ist.

Die Plattform BIMstocks wurde zum Teil in einem ähnlichen Ansatz erstellt, indem auf Basis der Typologisierung des Wiener Gebäudebestandes und ermittelten Materialintensitäten von Gebäudetyppvertretern die Materialmengen für den gesamten Gebäudebestand berechnet wurden. Die Besonderheit der Plattform bzw. dieses Forschungsprojektes liegt aber darin, dass für die Gebäudetyppvertretern die umfassenden BIM-basierte Materialinventare aus Daten der invasiven und nicht-invasiven Gebäudeerkundung erstellt wurden. Die Materialinventare dienen dabei nicht nur der Erfassung von Materialmengen und Lage der Materialien im Gebäude, sondern auch der Bewertung der Recyclingfähigkeit von Materialien auf Basis der Kriterien wie Sortenreinheit, Trennbarkeit und Schadstoffbelastung. Damit kann die Information über die verbauten Materialmengen um die Aussage über das tatsächliche Recyclingpotenzial dieser Materialien erweitert werden und somit die Genauigkeit bei Ermittlung von Materialflüssen sowohl auf der der Gebäude- als auch auf der Stadtebene erhöht werden. Der bei BIMstocks angewendeter Ansatz illustriert daher die Verknüpfung von Materialinventaren an den regionalen Materialkataster, wobei die konkrete Methodik der Datenstrukturierung, der Datenbewertung sowie der Integration der digitalen Technologien wie BIM und GIS zur Aufbereitung und Darstellung der erstellten Daten aufgezeigt wird.

Die Plattform Madaster kann als Illustration einer umfassenden Funktionalität von Materialinventaren zur Erfassung und Bewertung der Materialität und darauf aufbauender Analyse und Prognose der Materialflüsse in Gebäuden. Die Funktion der Aggregation von Daten einzelner

Gebäude auf einer bestimmten räumlichen Ebene stellt ein weiteres Beispiel zum Aufbau einer Datenbank für zusammenhängende Gebäudebestände auf Basis der Materialinventare dar.

Des Weiteren illustriert Madaster den Ansatz zur Strukturierung und Standardisierung der Daten aus unterschiedlichen Quellen wie BIM-Modelle oder Excel-Tabellen in einer einheitlichen Datenbank. Die Materialinventare fungieren dabei nicht nur als Dokumentation der Quantität, Qualität, Lebensdauer, Verortung und verwertungsrelevanten Konstruktionsmerkmale wie Trennbarkeit und Zugänglichkeit der Bauteile, sondern auch als Tool zur Analyse und Bewertung dieser Informationen zur Ermittlung der daraus entstehenden Materialflüsse, Umweltwirkungen und finanzielle Potenziale. Zudem stellt Madaster ein Beispiel dar, wie die Datenverwaltung in der Praxis, wobei der Datenaustausch in einer komplexen Akteurslandschaft stattfindet, umgesetzt werden kann.

Somit kann Madaster als Repräsentation eines umfassenden Ansatzes für die Erstellung, Benutzung und Verwaltung der Materialinventare angesehen werden, wodurch sowohl deren Potenziale für die Planung als auch deren Anschlussmöglichkeit an eine regionale Betrachtungsebene ersichtlich werden.

Die Abbildung 55 stellt eine Zuordnung der Ergebnisse der funktionalen Analyse zu den Bestandteilen des ganzheitlichen Konzeptes des Materialkatasters dar. Sie verdeutlicht, welche Plattformen als repräsentative Beispiele für spezifische Elemente innerhalb dieses Konzeptes – für Materialinventare oder regionale Materialkataster – dienen können. Insbesondere liefert die Analyse von M-DAB Einblicke in die Ausgestaltung eines regionalen Materialkatasters, während die Analysen von BIMstocks und Madaster Erkenntnisse zur Funktionalität sowohl von Materialinventaren als auch von regionalen Materialkatastern bieten.

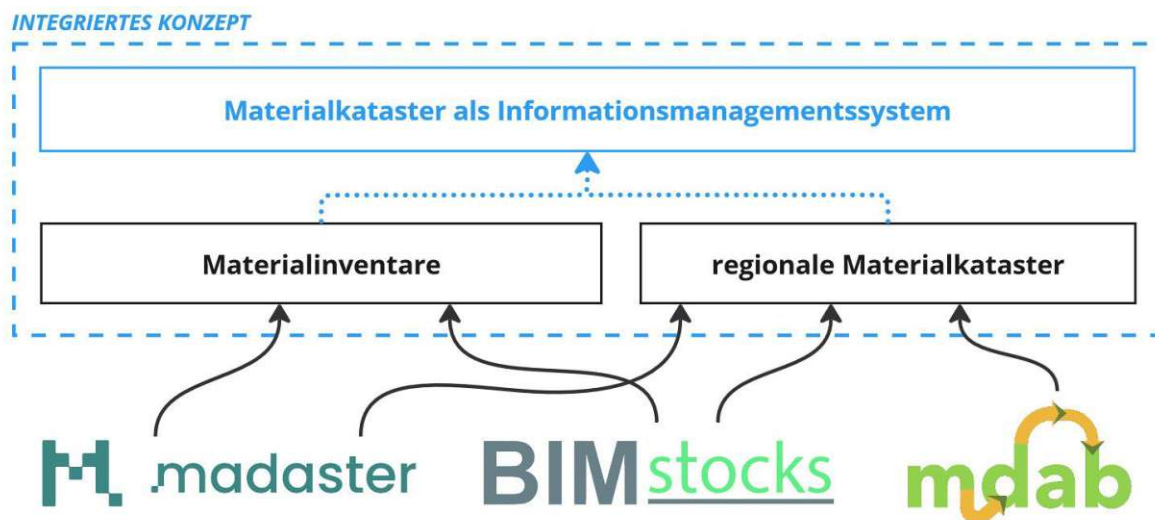


Abbildung 55: Zuordnung der Erkenntnisse der funktionalen Analyse zu den Elementen des gesamtheitlichen Konzeptes des Materialkatasters als Informationsmanagementsystems. Eigene Darstellung anlehnd an Schiller et al., 2022.

5. IDEALTYPISCHES MODELL DES MATERIALKATASTERS

5.1. Konzeption eines idealtypischen Materialkatasters

Die im Rahmen der Analyse bestehender Plattformen gewonnenen Erkenntnisse bilden eine Basis für die Konzeption eines idealtypischen Modells des Materialkatasters.

Dieses Modell orientiert sich an der von Schiller et al. (2022) vorgeschlagenen Integration von Materialinventaren und eines regionalen Materialkatasters in einem ganzheitlichen Informationsmanagementsystem (Schiller et al. 2022, 256-260). Die Kombination der entsprechenden Funktionen (vgl. Kapitel 4.3.8) in einem einzigen Tool soll der Komplexität der kreislauforientierten Planung gerecht werden, sowie Vorteile in Bezug auf folgende Aspekte bieten.

Maßstabsübergreifende Planungsunterstützung

Die Kombination der Funktionen auf der Gebäude- und auf der Stadtebene unterstützt integrierte Herangehensweise der kreislauforientierten Planung, indem die Informationen unterschiedlicher Planungsebenen zur Verfügung gestellt werden. Dies ermöglicht die Nutzung des Tools durch Planer:innen und Stakeholder aus verschiedenen Bereichen der kreislauforientierten Planung – von der stadtweiten bis zur gebäudespezifischen Ebene – und daher eine integrierte Entscheidungsfindung.

Zentralität der Daten

Aus Sicht der befragten Expert:innen (vgl. Kapitel 3.4.4) stellt die Zentralität der Daten eine grundlegende Voraussetzung für die effektive Integration und Nutzbarkeit der Informationen über den Gebäudebestand dar. Die Kombination der Funktionen des Materialinventars und des regionalen Materialkatasters ermöglicht eine zentrale Datenhaltung, indem die Daten sowohl der Stadt- als auch der Gebäudeebene in einzelner Datenbank zusammengeführt werden. Diese Lösung ist insbesondere hinsichtlich der Harmonisierung der Daten beider Komponenten vorteilhaft, da eine abgestimmte Struktur der Datenbank und der Quellen bereits in der Entwicklungsphase festgelegt werden kann. Darüber hinaus ermöglicht es einen geräteunabhängigen Zugriff auf die Katasterdaten.

Integration von Daten in einem Digitalen Zwilling

Die Integration des Materialkatasters mit dem geoZwilling der Stadt Wien (vgl. Kapitel 3.1.1) lässt Synergieeffekte hinsichtlich der Datenaktualität und Datenkonsistenz erzielen. Wie die funktionale Analyse zeigt, bauen die Plattformen M-DAB und BIMstocks auf den öffentlichen und nicht-

öffentlichen Geodaten der Stadt Wien auf. Wenn diese Daten in einem geoZwilling als einem Single Source of Truth¹⁰ erfasst würden, könnte der in dieses Informationssystem integrierte Materialkataster vom laufenden Zugriff auf immer aktuellen Grundlagen profitieren (*Luger & Rauh, 2020: S. 8-9*).

5.2. Struktur und Aufbau des Referenzmodells

Im Folgenden wird der Aufbau dieses Modells beschrieben und die Interaktion dessen Komponenten erläutert. Dabei werden die für Wien aktuellen Rahmenbedingungen in die Betrachtung des Systemkontextes der Plattform, insbesondere das Geodatenangebot der Stadt Wien, sowie zukünftige Innovationen wie BIM-basierte digitale Einreichung oder der geoZwilling, mit einbezogen.

Die Abbildung 56 stellt das Referenzmodell des Materialkatasters in Form eines Funktionsnetzes dar. Die Volllinien bilden die Prozess- und punktierten die Datenflüsse zwischen den Elementen des Modells ab.

Das funktionale Gerüst des Materialkataster als Planungsunterstützungssystems aus sechs Grundfunktionen (*vgl. Kapitel 4.2*). Für die weitere Darstellung des Modells werden diese in drei übergeordneten Gruppen gegliedert, wobei Erhebung der Information der Datenbeschaffung gleichgestellt wird:

Datenbeschaffung: Erhebung der Information

Funktionen der Datenverwaltung: Speichern und Abrufen der Information

Kommunikationsfunktionen: Visualisierung der Information, Kommunikation der Information

Analytische Funktionen: Analyse der Information, Modellierung der Information

Im Rahmen der **Datenbeschaffung** werden die notwendigen Daten gesammelt und aufbereitet, um dadurch einen einheitlichen Datensatz des Katasters zu erstellen. Dabei kommen die Formate wie IFC oder die tabellarischen Materialinventare sowie die GIS-Daten als Grundlage für die räumliche Verortung der Materialinformationen und für die Funktionen der Simulation auf der Stadtebene.

¹⁰ Zentraler Ort der Datenaggregation

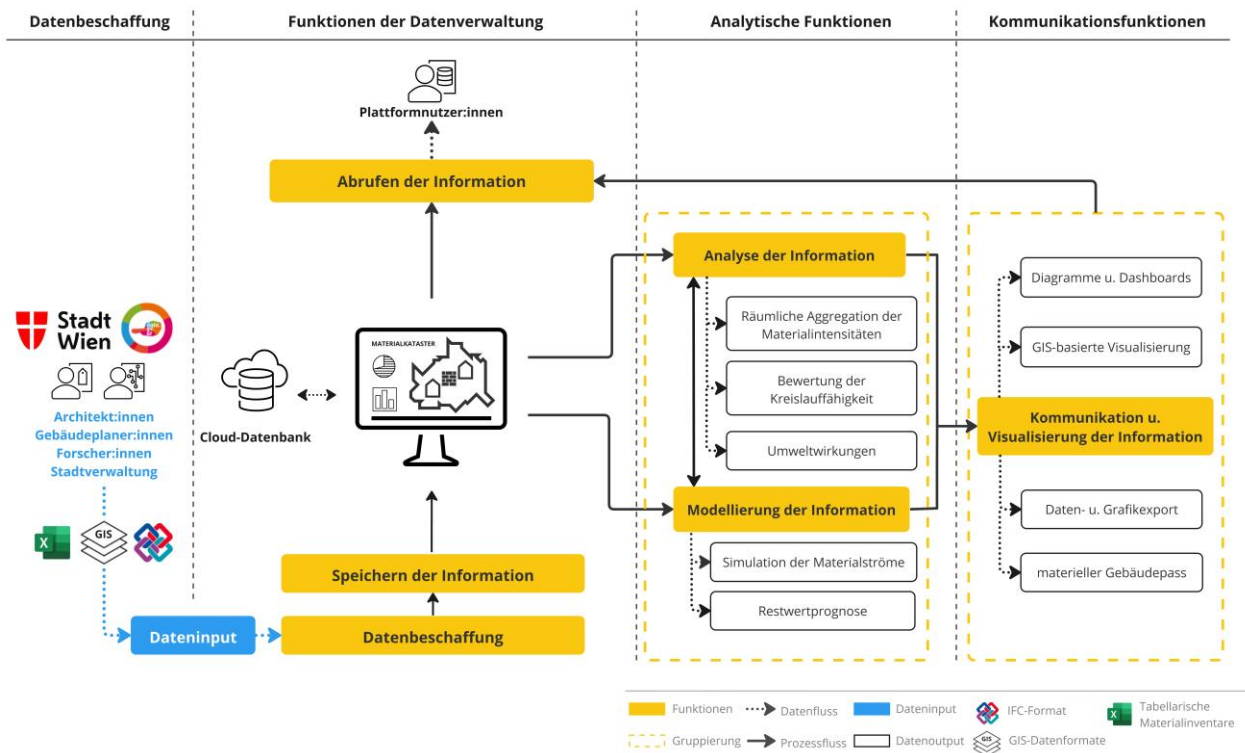


Abbildung 56: Referenzmodell eines idealtypischen Materialkatasters. Eigene Darstellung.

Darauf bauen die **Funktionen der Datenverwaltung** auf, die die Funktionen des Speicherns und Abrufens der Information umfassen. Diese Funktionen ermöglichen die Eingabe, den Zugriff und die Übermittlung der Grunddaten und der analytischen Datenoutputs des Materialkatasters an die Benutzer:innen mittels einer server- oder cloudbasierten Datenbank und einer interaktiven Benutzeroberfläche.

Die **analytischen Funktionen** ermöglichen die Analyse und Modellierung der Informationen auf Basis der im Rahmen der Datenbeschaffung erstellten Datengrundlage. Wie im Kapitel 5.2.3 erläutert wird, bauen diese Funktionen aufeinander auf und daher werden als ein zusammenhängender Prozess dargestellt. Die Datenoutputs der Funktionen bestehen aus verschiedenen Bewertungen und Prognosen sowohl auf der Stadt- als auch auf der Gebäudeebene.

Die **Funktionen der Visualisierung und Kommunikation** bilden eine zusammenhängende und aufeinander aufbauende Funktionsgruppe, da Visualisierung einen integralen Bestandteil der Kommunikation darstellt. Daher werden diese Funktionen gemeinsam als ein ganzheitliches Element dargestellt. Diese Funktionen ermöglichen die Ausgabe der Daten des Materialkatasters in verschiedenen Formaten, darunter GIS-basierte räumliche Visualisierungen, Diagramme und Dashboards, sowie die Erstellung von materiellen Gebäudepässen und den Export der Daten in menschen- und maschinenlesbaren Formaten.

In darauffolgenden Kapiteln werden die Abläufe und Outputs der Funktionen näher erläutert und als Teilprozesse des gesamten Referenzmodells dargestellt.

5.2.1. Datenbeschaffung zur Erstellung des Materialkatasters

Der Prozess der Datenbeschaffung für den Materialkataster umfasst die Erhebung der benötigten Daten aus unterschiedlichen Quellen und die anschließende Zusammenführung der Daten in die Datenbank der Plattform in einer strukturierten Form. Dabei stehen folgende Aufgaben im Fokus: (1) die Erfassung der Typen und Mengen von in Gebäuden verwendeten Materialien – der Materialintensitäten, und (2) deren Georeferenzierung in der Stadt durch ihre Verknüpfung mit den räumlichen Attributen der Gebäude.

Die Abbildung 57 zeigt den generalisierten Ablauf sowie die Datenquellen des Datenbeschaffungsprozesses. Die Darstellung erfolgt aus Perspektive des Plattformbetriebes, wobei die Rollen der Akteure hinsichtlich des Informationsinputs abgebildet werden. Der Prozessablauf erfolgt iterativ, indem der Datenbestand des Materialkatasters ständig ergänzt und aktualisiert wird. Für die Erfassung der Materialinformationen von Gebäuden sind folgende externe Prozesse hinsichtlich der Lieferung von Informationen maßgeblich: (1) Prozesse einer gezielten Bestandserhebung im Rahmen der (Weiter-)Entwicklung des Materialkatasters und (2) Prozesse des Planens und Bauens.

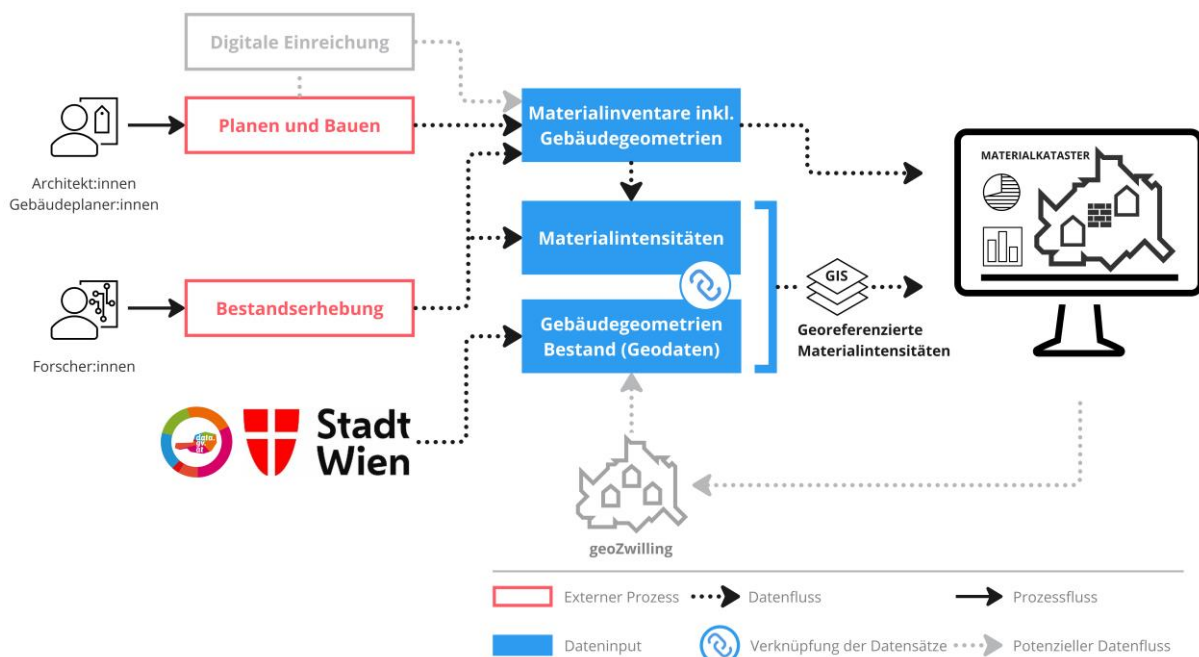


Abbildung 57: Generalisierter Ablauf des Datenbeschaffungsprozesses in einem idealtypischen Materialkataster. Eigene Darstellung.

Das Element **Bestandserhebung** bezeichnet den Prozessrahmen einer gezielten Erhebung der Materialmengen im gesamtstädtischen Gebäudebestand zur Schaffung des Grunddatensatzes des Materialkatasters. Im Betrieb der Plattform wird diese Grundlage ergänzt und aktualisiert.

Die Methode der Bestandserhebung besteht in der Typologisierung des Gebäudebestandes und Ermittlung von Typen und Mengen der Materialien in ausgewählten Typvertretern.

Die Erhebung der Materialmengen kann sowohl durch die Planauswertung als auch durch Gebäudeuntersuchung erfolgen. Die im Projekt BIMstocks entwickelte Kombination aus Planauswertung und Vor-Ort-Untersuchung der Typvertreter bietet ein Potenzial zur Teilautomatisierung des Prozesses bei gleichzeitiger Präzisionssteigerung durch den Einsatz fortschrittlicher digitaler Methoden und Werkzeuge wie BIM-Modellierung, Ground-Penetrating Radar und Machine Learning (vgl. Kapitel 4.3.2, Honic et al. 2023: S. 25-27, S. 30.32, S. 43-44).

Die Typen und Mengen der Materialien werden in den **Materialinventaren** erfasst und darauf aufbauend die Materialintensitäten von Typvertretern ermittelt. Daran anschließend werden die Materialmengen durch Multiplikation der Materialintensitäten mit den aus Geodaten stammenden Volumen oder Flächen der entsprechenden Gebäudetypen auf den gesamten Gebäudebestand hochskaliert (vgl. Kapitel 4.3.2). Durch solche Verknüpfung der Materialintensitäten mit den Geodaten entstehen die **georeferenzierten Materialintensitäten**, die die Gesamtmenge und räumliche Verteilung der im Gebäudebestand verbauten Materialien abbilden.

Die **Geodaten** werden sowohl für die Ermittlung (Grundrissflächen und -volumen, Nutzung, Bauperiode, Baualter etc.) und Verortung (Zuordnung zu administrativen Abgrenzungen wie Grundstücke oder Bezirke) von Materialintensitäten, als auch für die Erstellung der Simulationsmodelle (z.B. Bebauungsplan für die Erhebung der Flächenpotenziale oder Denkmalschutzstatus und Angaben zu Umbauten für die Ermittlung der Abrisswahrscheinlichkeit) benötigt (vgl. Kapitel 4.3.7). Die Geodaten können aus öffentlichen Quellen, insbesondere aus dem Open-Government-Data-Angebot, als auch aus nicht-öffentlichen Datenbeständen der Magistratsabteilungen der Stadt Wien stammen.

Die Integration des Materialkatasters in den zukünftigen **geoZwilling** der Stadt Wien (vgl. Kapitel 5.1) bietet Vorteile hinsichtlich der Qualität der Hochskalierung sowie der Analyse- und Simulationsergebnisse, denn es immer auf den aktuellen Stand zugegriffen wird.

Das Element **Planen und Bauen** stellt den Prozessrahmen für die Erfassung der Mengen und Materialien der geplanten oder bestehender Bauwerken dar, wobei die Daten als Materialinventare und als Gebäudegeometrien in einer strukturierten Form an den Materialkataster übermittelt werden.

Eine Möglichkeit ist die direkte Erfassung der materialbezogenen Bauwerksdaten durch Planer:innen, wenn der Materialkataster als Tool zur Unterstützung der Gebäudeplanung angewendet wird, insbesondere dessen Funktionen der Materialinventarisierung und darauf aufbauender Gebäudeanalyse (vgl. Kapitel 5.2.3, Kapitel 3.3.4). Dieser Anwendungsfall des

Materialkatasters kann sowohl in der Neubau- als auch in der Sanierungs- oder Umbauplanung stattfinden. Im Rahmen dieses Prozesses werden die strukturierten Materialinventare direkt auf der Plattform erstellt und in der Datenbank abgespeichert. Solche Benutzung der Plattform kann beispielsweise im Rahmen des Gebäudezertifizierungsprozesses stattfinden, insbesondere zur Projektbewertung hinsichtlich der Anforderungen der Zertifizierungssysteme.

Als Quelldateien können hierbei BIM-Modelle oder, falls die BIM-Methode im Projekt nicht angewendet wird, strukturierte Materiallisten hochgeladen werden, wie beispielsweise bei der Plattform Madaster (vgl. Kapitel 4.3.2, 4.3.3).

Eine zukunftsorientierte Möglichkeit ist die Erfassung der Gebäudedaten im Rahmen des digitalen Baubewilligungsverfahrens (Prozesselement **Digitale Einreichung**), wobei BIM-Modelle als Einreichunterlagen für die Prüfung der Projekte auf die Einhaltung von Rechtsvorschriften fungieren (vgl. Kapitel 3.4.4, insbesondere Forschungsprojekt BRISE).

Eine weitere, ebenso zukunftsgerichtete, Lösung zur Erfassung der materialbezogenen Gebäudeinformation aus den Planungs- und Bauprozessen stellt die Anwendung des materiellen Gebäudepasses dar (vgl. Kapitel 3.3.3). Der im Rahmen des Planungsprozesses erstellte materielle Gebäudepass kann die Informationen in einer strukturierten Form an den Materialkataster liefern. Der Vorteil dieser Methode besteht darin, dass der materielle Gebäudepass unabhängig der Anwendung von BIM im Rahmen des Bauprojektes erstellt werden kann. Eine Voraussetzung hierfür stellt der materielle Gebäudepass zu einer erforderlichen Unterlage des Baubewilligungsprozesses wird (vgl. Kapitel 6.4). Dies stellt eine prioritäre Methode dar, da die Baubewilligung verbindlich ist, wodurch die Kontinuität und Konsistenz des Datenflusses vom Planen und Bauen zum Materialkataster gewährleistet werden kann.

Eine wichtige Voraussetzung für die Anschlussfähigkeit der BIM-Modelle und des materiellen Gebäudepasses an den Materialkataster stellt die Entwicklung der Datenschnittstellen dar. Insbesondere sollte in der Entwicklungsphase ein Abgleich der Datenstrukturen durchgeführt werden, um einen korrekten und verlustfreien Datenaustausch zu gewährleisten.

Anschließend können diese Materialinventare den entsprechenden Gebäudetypen zugeordnet werden und damit zur Verbesserung des gesamtstädtischen Datensatzes beitragen (Schiller et al., 2022: S. 258-260), denn eine Voraussetzung für die Genauigkeit der Hochskalierung ist die Anzahl der erfassten Materialdaten der Typvertretern (Honic et al. 2023: S. 47).

Der gesamte Prozess der Datenbeschaffung liefert die Grundlagen für die weiteren Funktionen des Materialkatasters, die sowohl analytische Auswertung und Simulationen als auch Kommunikation und Visualisierung der Ergebnisse umfassen.

5.2.2. Funktionen der Datenverwaltung

Eine idealtypische Materialkataster-Plattform dient als zentraler Datenspeicher für Informationen, die für die Bewirtschaftung des Gebäudebestandes relevant sind, und ermöglicht den Zugriff auf diese Daten über eine interaktive Oberfläche. Abbildung 58 veranschaulicht den Ablauf der Datenverwaltungsfunktionen aus der Perspektive der Plattformnutzer:innen in einer generalisierten Form.

Der Materialkataster speichert und stellt Informationen zu Materialressourcen und deren Beschaffung sowohl für einzelne Gebäude als auch für den gesamtstädtischen Gebäudebestand bereit. Dies umfasst die Dokumentation des Ist-Zustands der materiellen Zusammensetzung sowie die Ergebnisse von Datenanalysen, wie beispielsweise modellierte Prognosen der Materialströme auf Stadtebene oder Bewertungen der Kreislauffähigkeit und CO₂-Bilanz der Gebäude.

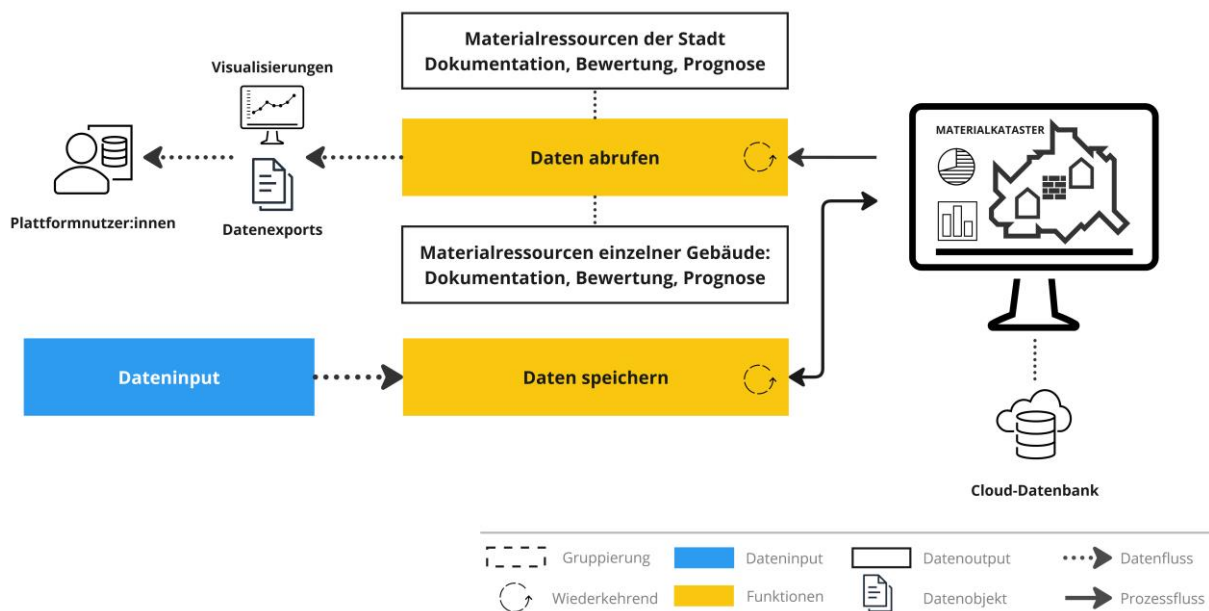


Abbildung 58: Generalisierter Ablauf der Funktionen der Datenverwaltung in einem idealtypischen Materialkataster. Eigene Darstellung.

Die Daten können in verschiedenen Visualisierungsformen sowie als Dateielexport zur Verfügung gestellt werden (vgl. Kapitel 5.2.4). Die Exportformate sollten möglichst flexibel und offen gestaltet sein, um eine maximale Kompatibilität mit anderen externen Tools zu gewährleisten.

Abbildung 59 zeigt die möglichen Modalitäten des Datenzugriffs. Da der Materialkataster Daten zu einzelnen Gebäuden sowie zum gesamten Gebäudebestand umfasst, kann der Zugriff auf die Daten unter Berücksichtigung des Datenschutzes über Benutzeraccounts implementiert werden, ähnlich wie es auf der Plattform Madaster realisiert ist (siehe Kapitel 4.3.3). Vollständige Datensätze einzelner Gebäude sollten dabei ausschließlich für die jeweiligen Gebäudeeigentümer:innen oder von diesen

autorisierte Parteien zugänglich sein. Materialintensitäten und -potenziale auf Stadtebene könnten hingegen in anonymisierter und aggregierter Form für alle Plattformnutzer:innen zugänglich gemacht werden. Dieser Prozess, der im Kapitel 5.2.1 beschrieben wird, illustriert den Aufbau der Datenbank des Materialkatasters, wobei Daten aus Planungs- und Bauprozessen auf die Plattform zur Dokumentation und Bearbeitung hochgeladen werden.

Ein webbasiertes visuelles Interface und eine Server- oder Cloud-Datenbank, wie sie in allen analysierten Plattformen verwendet werden, ermöglichen einen standort- und softwareunabhängigen Zugriff auf der Materialkataster und optimieren so die Anwendbarkeit im Planungsprozess.

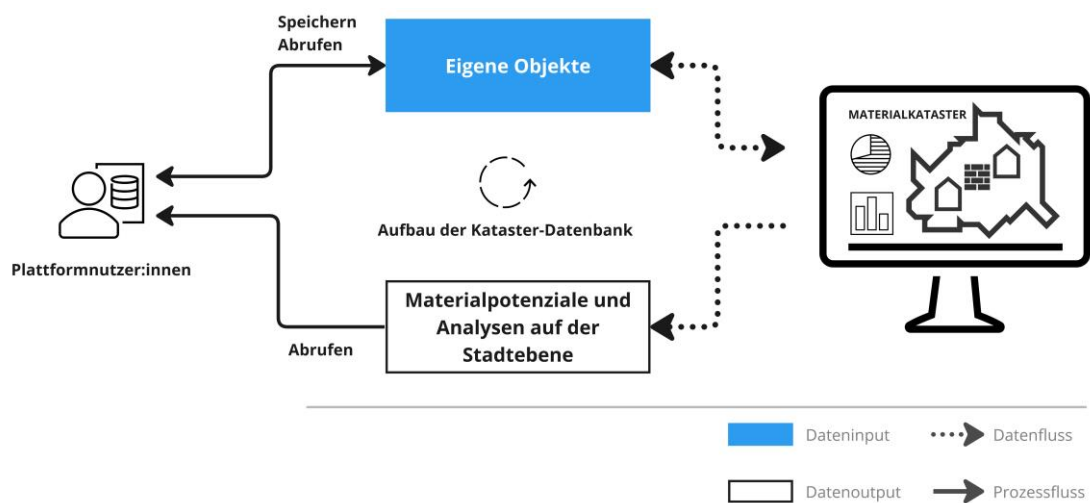


Abbildung 59: Mögliche Modalität des Datenzugriffs in einem idealtypischen Materialkataster. Eigene Darstellung.

5.2.3. Analytische Funktionen

Die analytischen Funktionen des Materialkatasters ermöglichen sowohl die Analyse als auch die Modellierung von Daten auf Stadt- und Gebäudeebene.

Die Funktion **Analyse der Information** basiert auf den Daten des Ist-Zustands der materiellen Zusammensetzung einzelner Gebäude sowie des gesamten Gebäudebestands und ermöglicht die Bewertung anhand verschiedener Kriterien.

Im Gegensatz dazu ermöglicht die **Modellierung der Information** die Prognose möglicher Entwicklungen spezifischer Eigenschaften einzelner Gebäude oder eine parametrisierte und szenarienbasierte Modellierung der Materialflüsse für die gesamte Stadt.

Auf der Stadtebene (Abbildung 60) bilden die Funktionen der Analyse und Modellierung einen zusammenhängenden Prozess. Die Analysefunktion umfasst die räumliche Aggregation der in Gebäuden verbauten Materialmengen, die als **georeferenzierte Materialintensitäten** auf Ebenen wie Baublöcke, Zählbezirke, die gesamte Stadt oder benutzerdefinierte Gebiete (z.B. bestimmte

Umkreise) aggregiert werden können. Dies ermöglicht die Lokalisierung und Abschätzung bestehender Materialmengen innerhalb bestimmter räumlicher Einheiten der Stadt. Allerdings stellt diese Information nur eine Momentaufnahme dar und trifft keine Aussage darüber, ob und wann diese Ressourcen tatsächlich verfügbar sein könnten.

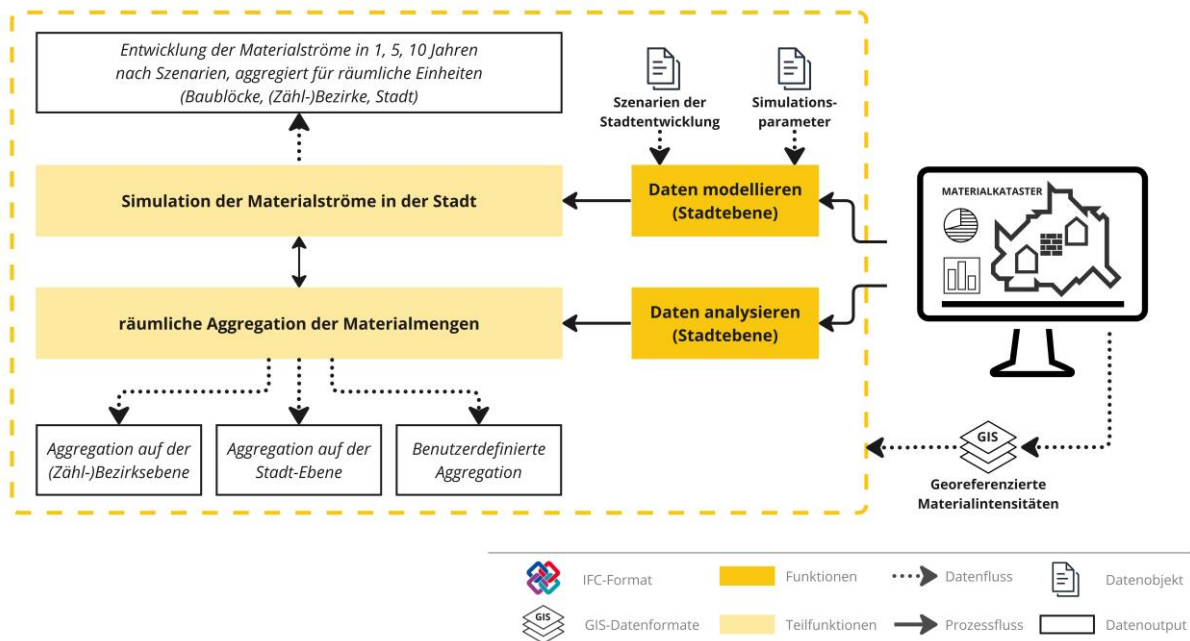


Abbildung 60: Generalisierter Ablauf der analytischen Funktionen auf der Stadtebene in einem idealtypischen Materialkataster. Eigene Darstellung.

Diese Information kann durch Modellierung der potenziellen Verfügbarkeit der Materialressourcen, insbesondere der voraussichtlichen Zeitpunkte der Abbrüche und Rückbauten in einem bestimmten Zeitraum, ermittelt werden. Hierbei kann der Ansatz der Plattform M-DAB angewendet werden, bei dem anhand von Szenarien und Simulationsparametern wie der „Abrissvulnerabilität“ und den ermittelten Geschoß- und Bauflächenpotenzialen (vgl. Kapitel 4.3.7) die zeitliche Entwicklung des Gebäudebestandes, insbesondere das voraussichtliche Abbruch- und Neubausvolumen, modelliert wird. Die Modellierung für kurzfristige Prognosen kann auf jährlicher Basis erfolgen, während die Zeiträume für mittel- und langfristige Prognosen auf fünf bis zehn Jahre festgelegt werden können. Die so ermittelten Mengen der potenziell verfügbaren Sekundärmaterialien sowie der mögliche Umfang ihres Einsatzes können anschließend mithilfe der Aggregationsfunktion für verschiedene räumliche Einheiten berechnet werden. Dies ermöglicht die Konkretisierung der Prognosen und Entwicklung von Strategien sowohl in Bezug auf die gesamte Stadt oder Region als auch auf die spezifische, räumlich zusammenhängende Bauwerksbestände.

Allerdings sollte bei der Auswertung der Ergebnisse solch einer Simulation die inhärente Unschärfe und Ungenauigkeit beachtet werden, da hochkomplexe Prozesse wie die bauliche Entwicklung des Gebäudebestandes aufgrund von Annahmen nur näherungsweise abschätzbar sind.

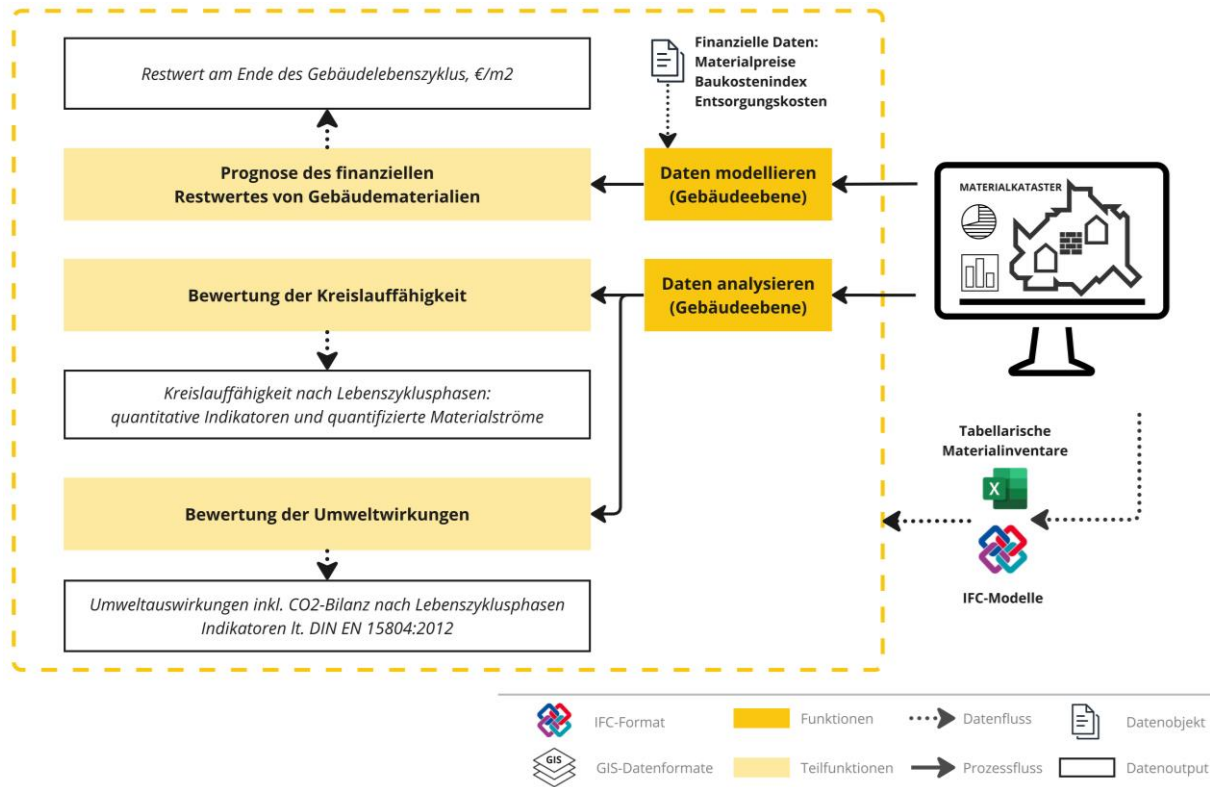


Abbildung 61: Generalisierter Ablauf der analytischen Funktionen auf der Gebäudeebene in einem idealtypischen Materialkaster. Eigene Darstellung.

Für die Analyse und Modellierung der Informationen auf der Gebäudeebene (Abbildung 61) werden Datensätze einzelner Gebäude herangezogen. Eine detaillierte Auswertung und umfassende Bewertung der Gebäudeeigenschaften erfordern einen hohen Detailgrad der Quelldaten. Hierfür eignen sich insbesondere **IFC-Modelle**, die im Rahmen der BIM-Planung erstellt werden und einen hohen, sich ständig aktualisierenden Informationsgehalt aufweisen. Eine wesentliche Voraussetzung dafür ist die standardisierte Datenstruktur der IFC-Modelle, welche die korrekte Übertragung der Materialinformationen in den Materialkaster ermöglicht (Bindreiter et al., 2022: S.36). Eine hierfür notwendige Lösung ist die Festlegung der Anforderungen an die Modellierung und Informationsstruktur der Modelle. Diese Standardisierung ist entscheidend, um anwender- oder firmenspezifische Datenstrukturen effektiv mit dem Materialkaster abzugleichen. Diese Anforderungen können beispielsweise im Rahmen der Digitalen Einreichung festgelegt werden (ebd.).

Ein weiteres Datenformat stellen die **tabellarischen Materialinventare** dar, die es ermöglichen, die Gebäudedaten von Projekten ohne BIM-Modelle zu übertragen. Hierbei ist ebenso eine standardisierte Vorlage für Datenstruktur bereitzustellen, um die korrekte Erfassung und Auswertung der Daten zu ermöglichen, wie es beispielsweise bei der Plattform Madaster umgesetzt wird (vgl. Kapitel 4.3.2).

Die Analyse der erfassten Materialdaten umfasst eine quantitative Bewertung der Kreislauffähigkeit sowie der Umweltwirkungen über den gesamten Gebäudelebenszyklus (vgl. Kapitel 4.3.6). Diese Bewertungen können sowohl die Umweltauswirkungen als auch das Potenzial des Gebäudes als Materiallager in messbarer Form ausdrücken, woraufhin informierte Planungsentscheidungen sowohl für die Entwurfsphase zur Optimierung der materiellen Zusammensetzung als auch für die Rückbauphase in Bezug auf Verwertungsszenarien getroffen werden können.

5.2.4. Funktionen der Visualisierung und Kommunikation

Die Funktionen der Visualisierung und Kommunikation sind entscheidend für eine effektive Auswertung der Analyseergebnisse und die Übermittlung der Materialkatasterdaten an die verschiedenen Akteure im Planungsprozess. Da Visualisierung als eine Form der Kommunikation verstanden werden kann, bauen diese beiden Funktionen aufeinander auf. Die Ergebnisse der Visualisierung bilden somit einen wesentlichen Teil der Kommunikationsfunktion des Materialkatasters (Abbildung 62).

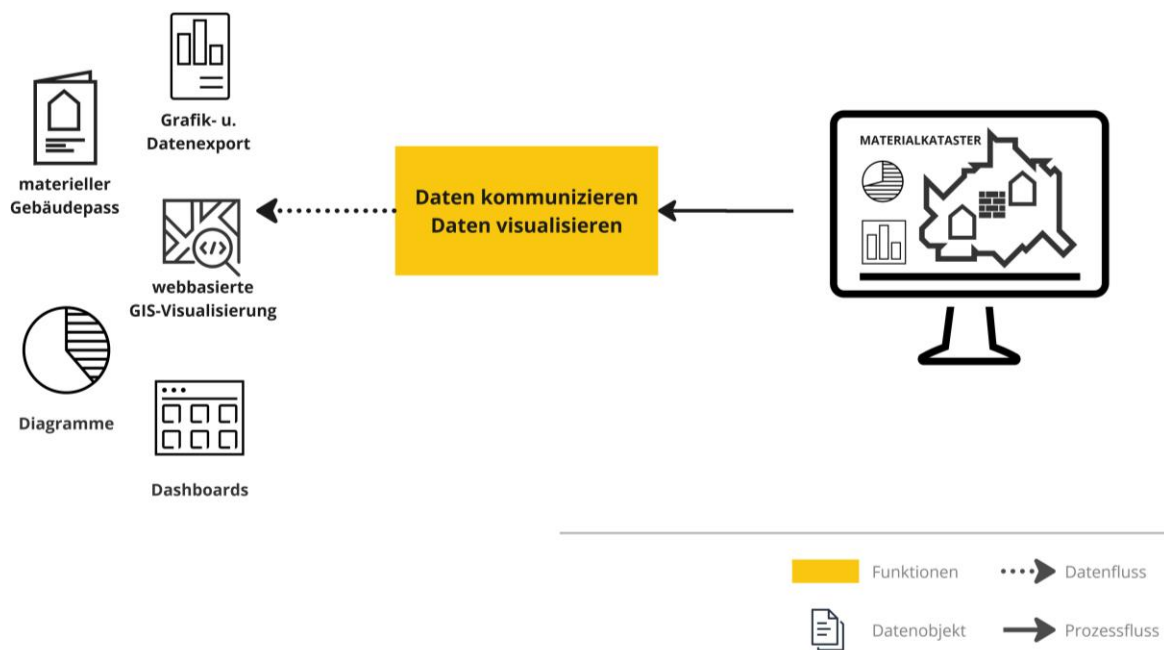


Abbildung 62: Generalisierter Ablauf der Funktionen der Visualisierung und Kommunikation in einem idealtypischen Materialkataster. Eigene Darstellung.

Die Visualisierung nutzt die erfassten sowie die durch Analyse und/oder Modellierung erzeugten Daten. Abhängig von der Art der Daten können verschiedene Visualisierungsmethoden angewendet werden. Für die räumliche Darstellung der Objektstandorte sowie der Materialressourcen der Stadt eignet sich eine **webbasierte GIS-Visualisierung**, wie sie von den Plattformen M-DAB und BIMstocks verwendet wird. Die Darstellung der Materialmengen einzelner Objekte oder innerhalb räumlicher Einheiten, wie Bezirke, erfolgt durch dreidimensionale Diagramme auf Karten. Komplexere Daten, wie die detaillierte Aufschlüsselung der Materialströme oder deren zeitliche Entwicklung, werden durch begleitende 2D-Diagramme visualisiert (vgl. Kapitel 4.3.4). Auswertungen der Gebäudedaten können ebenfalls in Form von **Diagrammen und Grafiken** auf verschiedenen **Dashboards** dargestellt werden, wie beispielsweise auf der Plattform Madaster umgesetzt.

Die visualisierten Informationen können direkt über die Plattform oder durch **Datenexport** kommuniziert werden. Zum Beispiel ermöglicht die Plattform Madaster die Erstellung eines **materiellen Gebäudepasses** in unterschiedlichen Detailgraden (vgl. Kapitel 4.3.5), der die Gebäudeinformationen, die verwendeten Materialien sowie die Ergebnisse der Gebäudebewertung in einer Kurz- oder Langfassung zusammenfasst und als PDF exportiert. Ein Gebäudepass dient als übersichtliche Zusammenfassung und effektives Kommunikationsmittel der Gebäudeinformationen und bietet eine geeignete Lösung für die Kommunikation der Gebäudeinformationen außerhalb der Plattform. Der materielle Gebäudepass dient daher als möglicher Informationsinput (vgl. Kapitel 5.2.1), beispielsweise wenn er in einer anderen Anwendung erstellt wird, sowie als Informationsoutput der Plattform, wenn diese für dessen Erstellung genutzt wird. Damit stellt der Materialkataster eine flexible Plattform dar, die sowohl die Daten von anderen Systemen importieren und integrieren als auch eigene Daten generieren und exportieren kann.

Bindreiter et al. (2022) beschreiben die räumliche Visualisierung im Kontext eines Materialkatasters als eine „niederschwellige Form der Analyse“, die als „Kommunikationsbasis und Planungsgrundlage für die strategische Festlegung von Entscheidungen zur nachhaltigen Materialressourcenplanung“ verwendet wird. Sie ermöglicht den Nutzer:innen in Bauwirtschaft und Verwaltung einen schnellen Zugriff auf Informationen zu den im Gebäudebestand versteckten Materialressourcen (Bindreiter et al., 2022: S. 13). Diese Funktion hat daher eine besondere Bedeutung für die Anwendung des Materialkatasters in integrierten Planungsprozessen und sollte möglichst flexibel und informativ gestaltet werden, um die verschiedenen Anforderungen der Planungsbeteiligten zu erfüllen.

6. HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN FÜR KREISLAUFORIENTIERTE PLANUNG

6.1. Empfehlungen zur Etablierung kreislauforientierter Planungsansätze

Wie in Kapiteln 2 und 3 beleuchtet, umfassen die kreislauforientierten Planungsansätze verschiedene Maßstabsebenen: von der Stadt- bis hin zur Gebäudeplanung. Auf Basis der Expert:inneninterviews konnten die Herausforderungen und mögliche Lösungen in diesem Kontext identifiziert werden. Auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse werden im Folgenden die Handlungsempfehlungen zur weiteren Integration der kreislauforientierten Ansätze in die Praxis formuliert. Im Kontext der jeweiligen Maßnahmen wird die mögliche Rolle des Materialkatasters in der idealtypischen Ausprägung (vgl. Kapitel 5) bei deren Umsetzung beleuchtet und damit die Bedeutung des Materialkatasters für die Etablierung der kreislauforientierten Planung aufgezeigt. Für die Handlungsempfehlungen werden vier Kategorien definiert:

- **Anreize schaffen**
Wirtschaftliche Anreize für die Implementierung der kreislauforientierten Ansätze
- **Digitalisieren**
Maßnahmen zur Unterstützung des Einsatzes digitaler Tools im Planungsprozess
- **Planen**
Integration der kreislauforientierten Kriterien in den Planungsprozess
- **Regulieren**
Regulative Verankerung von Kreislaufwirtschaftsprinzipien

Einige Handlungsempfehlungen können mehr als einer Kategorie zugeordnet werden, was ihre Querschnittsfunktion und die Breite ihrer Wirkungsbereiche verdeutlichen soll.

6.2. Indikatoren der Kreislauffähigkeit in der Bauordnung verankern

Regulieren Planen

Aus den Expert:inneninterviews geht hervor, dass die Messbarkeit eine wichtige Voraussetzung für das Verständnis über die Kreislauffähigkeit als Leistung eines Gebäudes darstellt. Um die Kreislauffähigkeit als Parameter in die Planung effektiv zu integrieren, sollen messbare Indikatoren dieser Leistung definiert und deren Implementierung erwirkt werden (*vgl. Kapitel 3.4.1*).

Daraus ergibt sich die Handlungsempfehlung, die quantifizierbaren Indikatoren der Kreislauffähigkeit in die Wiener Bauordnung zu integrieren, um klare und verbindliche Vorgaben zu schaffen, die für Erteilung der Baubewilligung erfüllt werden müssen. Ein bestimmter Erfüllungsgrad dieser Indikatoren sollte das Gebäude als genehmigungsfähig hinsichtlich der Kreislauffähigkeit definieren. Diese Indikatoren sollen verschiedene Aspekte, wie die Materialität, die Nutzungsflexibilität der Gebäudestruktur sowie die Trennbarkeit der Bauteilverbindungen umfassen (*vgl. Kapitel 3.2.3*). Darüber hinaus sollen sie die Bewertung der kreislauffähigen Leistung des Gebäudes sowohl in der Errichtungs- als auch in der Rückbauphase ermöglichen.

Die Indikatoren sollen daher durch nachvollziehbare Kriterien und Rechenansätze definiert werden, um den Planer:innen darüber Klarheit schaffen, welche Maßnahmen erforderlich sind, um die gesetzten Mindestwerte zu erfüllen.

Ein Beispiel für solche Indikatoren stellen die Zirkularitäts-Scores der Plattform Madaster (*vgl. Kapitel 4.3.6*) dar, welche die Kreislauffähigkeit als Massenanteile der recyclingfähigen, wiederverwendbaren, langlebigen sowie aus Sekundärrohstoffen hergestellten Materialien bewerten. Ein weiteres Beispiel sind die Indikatoren des materiellen Gebäudepasses der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) (*vgl. Kapitel 3.3.3*), die neben den ähnlichen massenbezogenen Indikatoren auch die Flexibilität und Anpassungsfähigkeit der Gebäudestruktur umfassen. Die entwickelten Indikatoren müssen Flexibilität aufweisen, um die Bewertung sowohl vom gesamten Gebäude als auch von spezifischen Baumaßnahmen, wie etwa die Sanierung eines Bestandsgebäudes, zu ermöglichen.

Um die Umsetzung der festgelegten Kriterien zu gewährleisten, soll die Einhaltung dieser Indikatoren nicht nur bei der Einreichung, sondern auch nach der Fertigstellung überprüft werden. Daher soll der Nachweis über die Einhaltung der Indikatoren als eine Unterlage der Fertigstellungsanzeige lt. §128 Wiener Bauordnung definiert werden. Damit wird dies zu einer Voraussetzung für die Erstattung einer „vollständig belegten Fertigstellungsanzeige“ und daher für die Benützung des Gebäudes (*Bauordnung für Wien, §128 Abs. 4*). In diesem Zusammenhang ist es notwendig, eine Prüfroutine zu entwickeln und im Planungsprozess vor der Ausführungsphase anzuwenden, um die für die Berechnung dieser Indikatoren relevanten Planungsentscheidungen,

die seit der Einreichung konkretisiert wurden, zu überprüfen. Damit soll das Risiko verringert werden, dass der ausgeführte Zustand die Mindestwerte der Indikatoren nicht mehr erfüllt.

Die Überprüfung der Indikatoren soll durch MA37 anhand automatisierter und manueller Prüfroutinen im Rahmen der Baueinreichung erfolgen.

Die Indikatoren samt Berechnungsansätzen können in der OIB-Richtlinie 7 festgehalten werden. Die OIB-Richtlinie 7¹¹ stellt eine Grundlage für die Integration kreislauforientierter Ansätze in den Planungsprozess dar, indem sie spezifische Anforderungen an die Gebäudeplanung wie Dauerhaftigkeit, Anpassungsfähigkeit, Abfallvermeidung, Rückbaubarkeit sowie Dokumentation von eingesetzten Materialien definiert (OIB, 2023).

Die OIB-Richtlinien werden von der Generalversammlung aus Landesvertreter:innen beschlossen und danach den Bundesländern zur Verfügung gestellt (OIB, o.J.; Achatz et al., 2021: S. 8). Danach können sie von Bundesländern in ihren Bauordnungen für verbindlich erklärt werden (*ebd.*). Der Vorteil der Verankerung der Indikatoren in der OIB-Richtlinie 7 besteht daher darin, dass sie sowohl bereits eine thematische Grundlage bietet als auch eine österreichweite Geltung dieser Standardisierung erwirken kann.

Der Materialkataster kann in diesem Kontext als Werkzeug genutzt werden, um die Einhaltung dieser Indikatoren sowohl während der Planungsphase als auch nach der Fertigstellung des Gebäudes zu überprüfen. Um dies zu ermöglichen, könnte die Funktion der Gebäudeanalyse des Materialkatasters (*vgl. Kapitel 4.3.6*) um die Berechnung der Indikatoren der Bauordnung erweitert werden. Dadurch könnten IFC-Modelle verschiedener Planungsvarianten in Bezug auf den Erfüllungsgrad der Indikatoren verglichen werden. Zudem könnte das IFC-Modell des gebauten Zustandes hinsichtlich der Einhaltung der Indikatoren überprüft werden. Darüber hinaus könnte die Notwendigkeit dieser Überprüfung eine günstige Voraussetzung für die Versorgung des Materialkatasters mit den Gebäudedaten schaffen, da diese Daten einen grundlegenden Teil der Berechnung dieser Indikatoren bilden.

¹¹ OIB-Richtlinie 7 „Nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen“ befindet sich aktuell in der Phase der Ausarbeitung. Aktuell existiert sie als „OIB-Grundlagendokument zur Ausarbeitung einer OIB-Richtlinie 7“, das den Überblick über die grundlegende Struktur, Begriffe und Inhalte dieser Richtlinie bietet. Die weiteren Verweise beziehen sich auf dieses Dokument und dessen Inhalt.

6.3. Kriterien der Kreislaufwirtschaft in die UVP integrieren

Regulieren Planen

Aus Sicht von Herrn Romm (2024) stellen die Maßnahmen der Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP), insbesondere in Bezug auf die nachhaltige Nutzung lokaler Ressourcen, eine effektive Grundlage für den kreislauf- und umweltgerechten Städtebau und sollten im Städtebau als Standard implementiert werden und „UVP überflüssig machen und ersetzen“ (Romm, 2024; vgl. Kapitel 3.4.2).

Eine darauf aufbauende Handlungsempfehlung ist es, die Kriterien der Ressourcenschonung und Nutzung lokaler Ressourcen in das Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz zu integrieren sowie dessen Anwendungsbereich im Städtebau auszuweiten. Durch die regulativ erweiterte Anwendung der kreislauforientierten Ansätze könnte langfristig eine Transformation des Städtebaus erzielt werden, indem entsprechende Planungsmethoden in der Praxis erprobt, weiterentwickelt und schließlich als fundamentale Bestandteile in die städtebauliche Planung etabliert werden.

Die im Jahr 2023 novellierte Fassung des UVP-G führte mit §6 das Bodenschutzkonzept als einen obligatorischen Teil der Umweltverträglichkeitserklärung ein. Dieses Konzept verlangt Ausführungen zur Nutzung von Flächen und Böden sowie Maßnahmen zum Bodenschutz wie beispielsweise Verringerung der Bodenversiegelung und Flächeninanspruchnahme.

Auf ähnliche Weise können auch Aspekte nachhaltiger Nutzung materieller Ressourcen in die UVP für Städtebauvorhaben integriert werden. Eine denkbare Lösung wäre hierbei die Anforderung eines Konzeptes in der Umweltverträglichkeitserklärung in Bezug auf den Umgang mit lokalen Materialressourcen sowie dem gebauten Bestand aus Sicht des Ressourcenschutzes. Das Konzept sollte insbesondere die projektspezifischen Maßnahmen beschreiben, die den Einsatz von am Standort oder regional gewonnenen Sekundärmaterialien fördern und den Primärressourcenverbrauch des Vorhabens reduzieren. Besondere Bedeutung in diesem Kontext käme hierbei der baustofflichen Aushubverwertung sowie dem Erhalt und der Anpassung am Projektstandort bestehender Bausubstanz als effizienten Maßnahmen zur Verringerung des Primärressourcenverbrauchs.

Zusätzlich sollen die Schwellenwerte für Städtebauvorhaben¹² um die spezifischen flächen- und gebäudehöhebezogenen Kriterien für Hochhäuser sowie Hochhausquartiere auch außerhalb von Kernzonen der UNESCO-Welterbestätten ergänzt werden, da solche Bauvorhaben aufgrund deren

¹² Die Schwellenwerte liegen aktuell bei 15 ha Flächeninanspruchnahme und einer Bruttogeschosßfläche von mehr als 150 000 m². Für die Einzelfallprüfungen der UVP-Pflicht liegen sie bei 3,75 ha. Für Bauvorhaben in UNESCO-Welterbestätten (Kernzone) betragen die Schwellenwerte für Einzelfallprüfung eine Gesamthöhe mindestens 35 m und eine Bruttogeschosßfläche mindestens 10 000 m² bzw. 5 000 m² für Umbauten (vgl. UVP-G 2000, Anhang 1 Z 18).

Kapazität sowohl städtebaulich relevant als auch mit hohem Materialeinsatz, Transportaufwand und daher bedeutsamen Umweltauswirkungen verbunden sind.

Darüber hinaus sollen die Schwellenwerte für Städtebauvorhaben basierend auf einer iterativen Analyse der aktuellen städtebaulichen Entwicklung in Österreich regelmäßig revidiert werden. Damit soll sichergestellt werden, dass sie dem aktuellen Entwicklungsmaßstab der Städte entsprechen.

Im Kontext dieser Handlungsempfehlung kann der Materialkataster als Instrument zur Analyse der vorhandenen standortspezifischen und regionalen Materialressourcen verwendet werden. Damit könnte insbesondere die inhaltliche Ausarbeitung der Ressourcennutzungskonzepte im Rahmen der Umweltverträglichkeitserklärung unterstützt werden.

6.4. Regulatorische Verankerung des materiellen Gebäudepasses

Regulieren Digitalisieren

Als Datensatz mit quantitativen und qualitativen Informationen zur Materialität des Bauwerkes dient der materielle Gebäudepass als Datenquelle für den Materialkataster. Um einen kontinuierlichen Aufbau des Datenbestandes des Materialkatasters zu unterstützen, muss die Erstellung des MGP zu einem Bestandteil des Planungsprozesses werden. Der MGP ist daher als erforderliche Einreichunterlage in der Wiener Bauordnung zu verankern: Damit wird die Lieferung der Daten verbindlich. Um die von Expert:innen hervorgehobene notwendige Aktualität der Daten zu gewährleisten (vgl. Kapitel 3.4.4), soll der MGP für den gebauten Zustand erstellt und als zusätzliche Unterlage zur Fertigstellungsanzeige (*Bauordnung für Wien, §128*) geliefert werden.

In diesem Zusammenhang kann eine Synergie mit der Handlungsempfehlung zur Festlegung der Indikatoren der Kreislauffähigkeit als Bewilligungskriterien (vgl. Kapitel 6.1) erzielt werden. Hierfür soll der MGP neben den Informationen zur Materialität des Bauwerkes auch die Indikatoren der Kreislauffähigkeit beinhalten, und damit als Nachweis zu deren Erfüllung dienen. Eine Konsolidierung dieser Informationen in einem Datensatz würde den Arbeitsaufwand reduzieren und den Überblick über die Informationen erleichtern.

Der Materialkataster dient in diesem Kontext als zentraler Register für MGP. Um die Anknüpfung des MGP an den Materialkataster, insbesondere die Konsistenz und Auswertbarkeit der Daten zu ermöglichen, soll die Datenstruktur der MGP standardisiert werden. Die Standardisierung soll das Format, den Inhalt und den Detaillierungsgrad der Daten umfassen, um den MGP als eine zuverlässige Datenquelle für den Materialkataster zu gestalten. Die Informationsanforderungen an den MGP können ähnlich wie die Indikatoren der Kreislauffähigkeit (vgl. Kapitel 6.1) in der geplanten OIB-Richtlinie 7 „Nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen“, insbesondere im Kapitel 2 „Dokumentation von Materialien und Ressourcen“ festgelegt werden.

6.5. Erhöhung des CO₂-Preises

Anreize schaffen Regulieren

Aus Sicht der befragten Expert:innen bietet der aktuell zu niedrige CO₂-Preis keinen ausreichenden wirtschaftlichen Anreiz für die Nutzung von Re-Use-Bauteilen oder Recycling-Baustoffen (*Angehrn, 2024; Macho, 2024; Sustr, 2024*).

Der CO₂-Preis in Österreich beträgt aktuell (Stand 2024) 45 Euro pro Tonne CO₂ (*WKO, 2023*) und wird im Rahmen des europäischen Emissionshandelssystems auf die Emissionen aus dem Energie- und Industriesektor angewendet. Um eine signifikante Verschiebung hin zu CO₂-sparenden Planungsmethoden und CO₂-armen Baumaterialien zu erreichen, wird eine Erhöhung dieses Preises für die Emissionen im Bausektor vorgeschlagen, die speziell durch den Energie- und Transportaufwand bei der Baustoffherstellung und durch direkte Bautätigkeiten verursacht werden. Diese sektorspezifische Anpassung des CO₂-Preises soll die wahren Umweltkosten der Bauaktivitäten adäquat widerspiegeln und dadurch einen stärkeren finanziellen Anreiz zur Reduktion dieser spezifischen Emissionen schaffen.

Um einen Effekt hierbei zu erzielen, ist aus Sicht von Herrn Angehrn (*2024*) eine deutliche Erhöhung dieser Abgabe, um das Achtfache bis Zehnfache, notwendig, wobei der Referenzwert für die Schätzung den CO₂-Preis für die Schweiz in der Höhe von CHF 120.- (ca. €124, Stand Mai 2024) beträgt (*Bundesamt für Umwelt BAFU, 2023*).

Durch höhere CO₂-Preise werden die Kosten für CO₂-intensive Baustoffe wie beispielsweise Primärbeton, sowie insgesamt für den Neubau steigen. Dies würde nicht nur die Wettbewerbsfähigkeit von Re-Use-Bauteilen und Recycling-Baustoffen steigern, sondern auch die Bestandserhaltung gegenüber dem Ersatzneubau durch wesentlich geringeren Energie- und Transportaufwand finanziell attraktiver machen. Im Neubau würden dadurch die CO₂-sparenden Maßnahmen wie On-Site-Recycling, Aushubverwertung, Einsatz CO₂-armer Baustoffe und Produkte oder Wiederverwendung von Bauteilen (*vgl. Kapitel 3.1.3 u. 3.4.2*) an Bedeutung gewinnen, wobei durch Kombination der Maßnahmen höhere CO₂-Einsparung erzielt werden kann.

Darüber hinaus könnten damit Bauprodukthersteller motiviert werden, ihre Geschäftsmodelle anzupassen, um die veränderten Kostenstrukturen zu berücksichtigen und ihre Wettbewerbsfähigkeit zu verbessern. Dies kann die Produktionsansätze wie Anwendung von Sekundärrohstoffen sowie innovative Geschäftsmodelle wie die Bauteilvermietung mit Herstellerrücknahme im Sinne des Cradle-to-Cradle-Konzeptes umfassen (*vgl. Kapitel 3.1.2*). Die langfristigen Umweltkosten würden damit in die Produktkosten eingerechnet, wodurch Bauprodukte so gestaltet werden sollten, dass eine spätere Rücknahme und Wiederverwendung wirtschaftlich sinnvoll sind.

Die Erhöhung des CO₂-Preises im Bausektor sollte allgerings schrittweise umgesetzt werden und durch Förderprogramme zur Umstellung der Branche auf CO₂-sparende Prozesse und Praktiken begleitet werden (vgl. Kapitel 6.8). Dies sollte sowohl die finanziellen Lasten abfedern, die durch die Erhöhung des CO₂-Preises entstehen könnten, als auch die Umsetzbarkeit und Akzeptanz der Maßnahmen zur Dekarbonisierung in der Baubranche unterstützen.

Im diesem Kontext bietet der Materialkataster eine Übersicht über die Kapazitäten und Beschaffenheit der regionalen Sekundärmaterialquellen. Diese Information können insbesondere in die Prozessplanung der Baustoffherstellung sowie der Gebäudeerrichtung zwecks Kostenersparnis und Prozessoptimierung einbezogen werden. Die Funktion der CO₂-Bilanzierung auf der Gebäudeebene ermöglicht den Vergleich verschiedener Planungsvarianten und Ermittlung der CO₂- und somit die Kostenreduktionspotenziale verschiedener Bauweisen. Die Dokumentation der verbauten Materialien ermöglicht auch den zukünftigen Zugriff auf die Daten über die regionale Potenziale der Sekundärmaterialien.

6.6. Kreislaforientierte Kriterien in den öffentlichen Ausschreibungen

Anreize schaffen Planen

Die Stadt Wien, als der wichtigste Akteur der Stadtentwicklung, kann durch gezieltes Handeln Anreize für kreislaforientierte Planungsansätze schaffen. Dies kann sowohl die Beauftragung von Planungsleistungen als auch die Beschaffung von Baumaterialien umfassen (vgl. Kapitel 3.1.1).

Ein effektives Instrument hierfür sind öffentliche Ausschreibungen. Die Stadt kann in ihren Ausschreibungen für den Bau eigener Objekte den Einsatz von nachhaltigen Recyclingmaterialien und kreislaufgerechten Planungslösungen als Vergabekriterien festlegen, um damit diese Aspekte in die Planung und Ausführung zu integrieren. Durch solche Vorgaben kann die Stadt Wien als bedeutender öffentlicher Bauherr nicht nur einen Markt und Wettbewerb für nachhaltige Bauprodukte und Planungsleistungen stimulieren, sondern auch eine Vorbildrolle übernehmen.

Dies folgt dem Beispiel der Stadt Zürich, die laut der „Ressourcenstrategie ‘Bauwerk Stadt Zürich‘“ in ihren stadteigenen Bauprojekten den Einsatz von Recyclingbeton vorschreibt, um dessen breite Anwendbarkeit zu demonstrieren und die Akzeptanz dieses Baustoffes zu erhöhen (Stadt Zürich, 2009: S. 11). Dabei sollte insbesondere die Vereinbarung mit Planer:innen getroffen werden, dass „für alle geeigneten Anwendungen generell RC-Beton eingesetzt werden soll“ sowie die Verfügbarkeit von RC-Beton innerhalb von 25 km geprüft wird (ebd., S. 20), um die ökologischen Vorteile des Recyclingbetons zu erzielen (vgl. Kapitel 2.4). Bei der Realisierung sollte überprüft werden, ob die RC-Anteile (Anteile der rezyklierten Gesteinskörnung) eingehalten wurden, um die tatsächliche Umsetzung dieser Maßnahmen zu erwirken.

In diesem Kontext kann der Materialkataster dabei unterstützen, realistische Vorgaben für den Einsatz von Recycling-Beton zu definieren. Durch die detaillierte Erfassung und Analyse der lokal verfügbaren Materialressourcen kann eine Strategie zur Nutzung von Recycling-Baustoffen basierend auf dem identifizierten Potenzial entwickelt werden. Diese Informationen ermöglichen es, die Anteile des RC-Betons in städtischen Bauprojekten so festzulegen, dass sie sowohl ökologisch sinnvoll als auch ökonomisch umsetzbar sind.

6.7. Kreislaufprinzipien in den Planungsprozess integrieren

Planen

Aus den Expert:innengesprächen geht hervor, dass die frühzeitige Erhebung und Analyse der Informationen über die Ressourcenumgebung des Projektstandortes eine wesentliche Voraussetzung für die effiziente Nutzung lokaler Ressourcenpotenziale darstellt. Dabei ist es entscheidend, dass alle maßgeblichen Zusammenhänge bereits in frühen Planungsphasen ausreichend ermittelt werden, um die Machbarkeit der darauf basierenden Maßnahmen zu gewährleisten, sowie den möglichen Ablauf- und Terminkonflikten vorbeugen.

Die darauf aufbauende Handlungsempfehlung besteht darin, dass die Perspektive der Ressourcenschonung die Prämisse der Planung auf allen Ebenen darstellen soll. Entscheidungen müssen dahingehend überprüft werden, ob sie eine wertschöpfende Nutzung lokaler Ressourcenpotenziale ermöglichen. Die Reichweite der Lokalität der Ressourcen kann dabei von der gesamtstädtischen Ebene bis hin zur Bauwerksebene variieren – von bauplatzübergreifenden Ansätzen wie Boden- und Aushubverwertung bis hin zur Wiederverwendung von Bauteilen aus Rückbauten in der lokalen Umgebung.

Als strukturierter Leitansatz sollen die R-Strategien unter Berücksichtigung deren Hierarchie in den Entwicklungszielen des Projektes integriert werden (*vgl. Kapitel 3.1.3*). Demnach sind die Planungsentscheidungen hinsichtlich ihres Beitrags zur Umsetzung dieser Strategien zu betrachten und zu optimieren. Die Maßnahmen sollen möglichst hohe Stufen der Strategiehierarchie anstreben und in ihrer Gesamtheit eine Kombination der R-Strategien darstellen, um den größtmöglichen Effekt hinsichtlich der Ressourceneffizienz des Projektes zu erzielen.

Im diesem Kontext stellt der Materialkataster eine wichtige Informationsquelle zur frühzeitigen Erkennung der lokalen Ressourcenpotenziale sowie für die Analyse der Eigenschaften erkannter Ressourcen dar. Auf der städtischen Ebene können auf Basis der Informationen über die Mengen der verbauten Materialien die bestehenden Materialflüsse der Stadt festgestellt, sowie auf Basis der szenarienbasierten Simulation für die Zukunft modelliert werden, wie dies beispielsweise von der Stadt Zürich umgesetzt wurde (*Stadt Zürich, 2009: S. 5*). Die dadurch gewonnenen Erkenntnisse

können in die Entwicklung der städtischen Ressourcenstrategien einfließen und der Überprüfung sowie Optimierung der bereits eingeleiteten Maßnahmen dienen (*ebd.*).

Auf der Ebene der Quartiers- oder Objektplanung kann auf Basis der Informationen des Materialkatasters die Vor-Ort-Untersuchung der materiellen Zusammensetzung rückbaureifer Bauwerke und daher die Entwicklung der Verwertungskonzepte unterstützen, wodurch diese Prozesse mit einem geringeren Aufwand und verringertem Fehlerpotenzial durchgeführt werden können. Darüber hinaus ermöglicht die Dokumentationsfunktion des Materialkatasters die Herstellung einer Datenbasis für die ähnlichen Prozesse in der Zukunft.

6.8. Monetäre Anreize für kreislauforientiertes Planen und Bauen

Anreize schaffen

Die interviewten Expert:innen nennen die höheren Material- und Planungskosten als eine wesentliche Herausforderung für die Implementierung kreislauforientierter Planungsansätze. Als ein effektives Instrument zum Kostenausgleich werden von den Expert:innen Förderungen angesehen. Daraus ergibt sich die Handlungsempfehlung, Förderprogramme zur Unterstützung der kreislauforientierten Planung, Bau und Produktion zu etablieren, um dadurch kumulative Effekte zu erzielen.

Einerseits sollen sowohl die Herstellung als auch die Beschaffung von CO₂-armen Materialien und wiederverwendbaren Bauteilen gefördert werden, um damit nachhaltigeren Bauprodukten einen Wettbewerbsvorteil zu verschaffen. Andererseits sollen die Bauprojekte mit klaren Nachhaltigkeitszielen und Ansätzen unterstützt werden. Hierbei könnten die Fördermittel nicht nur die direkten Projektkosten abdecken, sondern auch die Entwicklung innovativer Technologien im Rahmen dieser Projekte unterstützen, um die Innovation in der Praxis zu erproben.

Als eine wichtige Voraussetzung lässt sich hierbei die Langfristigkeit der Förderprogramme definieren. Die Förderprogramme müssen eine Verhaltensänderung bewirken und so gestaltet sein, dass sie lang genug bestehen, um eine nachhaltige Veränderung in der Baubranche zu erreichen und somit einer kostenbedingten Rückkehr zu weniger nachhaltigen Praktiken vorzubeugen.

Als weiteres Hemmnis für die Umsetzung nachhaltigkeitsorientierter Projekte betont Herr Romm (2024) die noch unzureichende Verankerung der bei kreislaufgerechter Planung notwendigen Leistungen in den Honorarleitlinien und Leistungsbildern, beispielsweise in Bezug auf die städtebaulichen Entwicklungsaufgaben oder die Tragwerksplanung (Romm, 2024). Daraus lässt sich

die Handlungsempfehlung ableiten, die Leistungsmodelle und Vergütungsmodelle (LM.VM)¹³ um die spezifisch auf die Ressourcenschonung ausgerichteten Leistungen zu ergänzen.

Die LM.VM sind ein modular aufgebautes, nach Fachbereichen (z.B. Raumplanung, Umweltplanung, Objektplanung etc.) und nach Projektphasen gegliedertes Nachschlagewerk, in dem „alle Leistungen von Ziviltechniker:innen detailliert beschrieben und Vergütungsmodelle abgebildet sind“ (*Kammer der Ziviltechniker:innen Arch+Ing / Tirol und Vorarlberg, o. J.*). Damit bieten die LM.VM eine branchenweite Referenz für die Gestaltung des Planungsprozesses sowie für die Ausschreibung, Vergabe und Vergütung (*ebd.*).

In einigen Leistungsmodellen wie „Bauphysik+Nachhaltigkeit“ oder „Objektplanung Architektur“ sind die nachhaltigkeitsorientierten Leistungen bereits enthalten: Beispielsweise die Implementierung der Anforderungen von Zertifizierungssystemen, Analyse der Umweltauswirkungen von Bauprodukten, Gebäude- und Bauteildokumentation, Rückbaukonzepte etc. (*vgl. Lechner, 2023a; vgl. Lechner, 2023b*). Ein weiterführender Ansatz wäre, zusätzliche Leistungen der städtebaulichen Planung hinsichtlich kreislauforientierter Nutzung der Standortressourcen in die LM.VM für Raumplanung, Umweltplanung und Objektplanung zu integrieren. Diese Ergänzungen könnten insbesondere den erforderlichen Leistungsumfang für die Analyse lokaler Verwertungspotenziale, die Entwicklung der Logistikkonzepte sowie die Koordination der Fachplanungen umfassen (*vgl. Kapitel 3.4.2*). Dies ermöglicht die Anforderungen, den Aufwand und die interdisziplinäre Komplexität des kreislauforientierten Planungsprozesses in den branchenüblichen Leistungsbildern und Honorarleitlinien festzuhalten und dadurch eine umfassende Basis für die Honorierung spezifischer Leistungen zu schaffen.

¹³ Die LM.VM und die weiterführenden Informationen können unter folgendem Link abgerufen werden https://www.arching.at/mitglieder/552/leistungsmodelle_20142023.html abgerufen am 18.05.2023

7. FAZIT UND AUSBLICK

Diese Arbeit untersucht die Rolle des digitalen Materialkatasters bei der Umsetzung kreislauforientierter Planungsprinzipien. Sie zielt darauf ab, die These zu überprüfen, dass **die Integration eines Materialkatasters in den Planungsprozess eine wichtige Voraussetzung für die Etablierung der kreislaufgerechten Bauwirtschaft und Stadtentwicklung ist.**

Zur Überprüfung der These wurde ein Orientierungsrahmen aus vier Forschungsfragen zur Untersuchung wichtiger Aspekte des Themas aufgestellt. Die Erkenntnisse werden unter den jeweiligen Forschungsfragen dargestellt. Darauf aufbauend erfolgt eine abschließende Bewertung der These.

Welche Bedeutung hat Kreislaufwirtschaft für die ressourcenschonende und umweltgerechte Stadtentwicklung und Bauwirtschaft?

Die Konzepte der Kreislaufwirtschaft wie Cradle-to-Cradle oder die R-Strategien Reduce-Reuse-Recycle bieten einen umfassenden und in der Bauwirtschaft implementierbaren Ansatz, der darauf abzielt, der Entstehung vom Abfall durch Nutzung des Bestehenden vorzubeugen, die Verwendung der Sekundär- statt Primärrohstoffen zu steigern, sowie die aus der Bautätigkeit resultierenden Umweltbelastungen zu verringern. In diesem Kontext stellt die bereits hohe Recyclingquote der Bau- und Abbruchabfälle in Österreich zwar eine beachtenswert positive Situation dar, bezieht sich aber auf die unterste Prioritätsstufe der kreislauforientierten Strategien sowie erfordert eine kritische Betrachtung hinsichtlich der Recyclingqualität, insbesondere ob das durch Recycling gewonnenes Material am Ende der Nutzungsdauer wieder im Kreislauf geführt werden kann. Um einen signifikanten Beitrag zur Ressourcenschonung und Umweltentlastung zu leisten, sollten die Kreislaufprinzipien über die ganze Hierarchie der R-Strategie implementiert werden, um eine kumulative Wirkung dieser Strategien zu erzielen.

Die Analyse der Smart Klima City Strategie hat gezeigt, dass die Stadt Wien sowohl die Notwendigkeit als auch die Potenziale der Integration der Kreislaufprinzipien ins Planen und Bauen hinsichtlich des Klima- und Ressourcenschutzes erkennt und diesbezüglich die entsprechenden strategischen Ziele setzt. Gleichzeitig lässt sich daraus auch der erhebliche Umfang und die Langfristigkeit der Maßnahmen zur Erreichung dieser Ziele erkennen.

Daraus lässt sich schließen, dass die Strategie der Kreislaufwirtschaft ein hohes, aber noch lange nicht implementiertes Potenzial für die Ressourcenschonung in der Stadtentwicklung besitzt. Die Problematik liegt dabei in der Komplexität sowie im Umfang erforderlicher Maßnahmen und Prozessanpassungen. Für eine erfolgreiche Umsetzung der Kreislaufprinzipien ist insbesondere notwendig, zahlreiche Maßnahmen und Planungsmethoden weiterzuentwickeln und in

Kombination anzuwenden, um einen Wandel hin zu einer kreislauforientierten Bauwirtschaft und Stadtentwicklung zu bewirken.

Welche Ansätze und Tools lassen die Kreislaufwirtschaft in der Stadt- und Gebäudeplanung implementieren?

Die Ansätze der kreislauforientierten Planung erstrecken sich über alle Maßstabebenen und Phasen des Planens und Bauens und reichen von der städtebaulichen Planung, die auf die effiziente Steuerung der Massenströme ausgerichtet ist, bis hin zur Tragwerks- und Detailplanung im Hochbau, wobei die Kriterien wie Flexibilität und Anpassungsfähigkeit der Gebäudestrukturen sowie die Trennbarkeit der Bauteile maßgeblich sind.

Die gewonnenen Erkenntnisse verdeutlichen, dass der größte Beitrag zur Ressourcenschonung in der Stadtentwicklung durch den Erhalt und die Weiterentwicklung bestehender Stadt- und Gebäudestrukturen geleistet wird, insbesondere durch Maßnahmen wie Nachverdichtung, Sanierung und Funktionsanpassung. Diese Planungsstrategien ermöglichen es, die bereits eingesetzten Ressourcen in einem Kreislauf der nachhaltigen Nutzung zu halten und minimieren durch die Vermeidung von Ersatzneubauten sowohl den Ressourceneinsatz als auch das Aufkommen von Bau- und Abbruchabfällen. Folglich sind die neuen Strukturen so zu entwerfen, dass sie langfristig nutzbar und mit minimalem Ressourcenaufwand transformierbar sind. Hierbei können zwei wichtige Faktoren betont werden: Zum einen das Verständnis für die lokalen Potenziale des Bauplatzes und der Stadt hinsichtlich der Gewinnung von Sekundärrohstoffen, um diese im Projekt effektiv einzusetzen, und zum anderen die Implementierung planerischer Maßnahmen zur zukünftigen Rückbaubarkeit und Trennbarkeit der Bauteile und Materialien, die es ermöglichen, die eingesetzten Ressourcen für zukünftige Wiederverwendung und -verwertung bereitzustellen.

Des Weiteren lässt sich aus den Erkenntnissen folgern, dass mit zunehmendem Planungsmaßstab auch ein größerer Beitrag zur Ressourcenschonung geleistet werden kann. Beispielsweise können die Entscheidungen auf städtebaulicher Ebene den Ressourcenaufwand und die Emissionen in einem erheblichen Maßstab reduzieren.

Um die Kreislaufgerechtigkeit des Vorhabens zu maximieren, soll die Umsetzung der kreislauforientierten Planungsmaßnahmen einer integrativen Strategie folgen, die einerseits Ansätze aus verschiedenen Planungsdimensionen vereint und andererseits die Prozessbeteiligung aller relevanten Fachplaner:innen berücksichtigt.

In diesem Kontext ermöglichen die digitalen Tools und Technologien wie GIS, BIM, materieller Gebäudepass und Materialkataster die Dokumentation, Analyse und Bereitstellung der für die kreislauforientierte Planung relevanten Informationen, insbesondere über die Mengen, Beschaffenheit und räumliche Verortung der Materialressourcen in anthropogenen Lagerstätten.

Obwohl die strategischen Vorgaben der Smart Klima City Strategie der Stadt Wien und der aktuelle Stand der Technik bei digitalen Tools eine günstige Ausgangslage für die Implementierung kreislaforientierter Ansätze sowie der dazugehörigen digitalen Instrumente darstellen, steht die aktuelle Planungspraxis vor wirtschaftlichen und regulatorischen Herausforderungen, die einen Handlungsbedarf auf der rechtlich-strategischen Ebene identifizieren lassen.

Über welche Funktionen und Eigenschaften sollte ein Materialkataster als Planungsunterstützungssystem aufweisen?

Ein idealtypischer Materialkataster kombiniert die Funktionen sowohl auf der Stadt- als auch auf der Gebäudeebene, um damit die Planungsaufgaben auf verschiedenen Maßstabsebenen erfüllen zu können.

Zu den grundlegenden Funktionen des Materialkatasters gehört die Speicherung und Bereitstellung der erfassten Daten sowie der Ergebnisse der Datenanalysen. Die analytischen Funktionen des Materialkatasters ermöglichen spezifische Auswertungen sowohl auf der Stadt- als auch auf der Gebäudeebene. Die analytischen Funktionen auf der Stadtebene umfassen die Aggregation von Materialmengen stadtweit sowie die quantitative Prognose der Materialflüsse basierend auf verschiedenen Szenarien. Diese Funktionen unterstützen die Ausarbeitung städtischer Strategien zur Bestandsentwicklung und liefern Erkenntnisse hinsichtlich der daraus resultierenden Materialflüsse und Umweltauswirkungen.

Auf der Gebäudeebene ermöglicht der Materialkataster die Bewertung der Umweltwirkungen und der Kreislauffähigkeit der Bauweise und der Materialität des Gebäude sowie die quantitative Prognose der am Ende des Gebäudelebenszyklus zu erwartenden Materialströme und des finanziellen Restwerts der verbauten Baustoffe.

Die Erstellung des Datensatzes für den Materialkataster ist allerdings mit Herausforderungen bei der Datenbeschaffung verbunden. Obwohl die technische Dimension dieser Herausforderung dank verschiedener Forschungsprojekte weit fortgeschritten ist, fehlt es noch an einer klaren Modalität zur Gewinnung und Aktualisierung von Daten. Hierfür werden Handlungsempfehlungen vorgeschlagen, die sich auf die regulative Ebene beziehen, insbesondere auf die Novellierung der Wiener Bauordnung, um eine rechtliche Grundlage für diesen Prozess zu schaffen. Dieser Ansatz soll sicherstellen, dass das Vorliegen der für den Materialkataster relevanten Informationen zu einem Bestandteil des Baubewilligungsverfahrens wird.

Die Aktualität der grundlegenden Geodaten des Materialkatasters ist eine wichtige Voraussetzung für die Qualität der Analyse auf der Stadtebene, da diese Daten zum Teil auf amtlichen Geodaten basieren. In diesem Zusammenhang wird die Integration des Materialkatasters in den geoZwilling

der Stadt Wien als mögliche Lösung betrachtet, die auch den fortlaufenden Bezug aktueller Geodaten ermöglichen soll.

In diesem Kontext lässt sich der weitere Forschungsbedarf identifizieren. Ein Aspekt bezieht sich auf die Weiterentwicklung der Methoden automatisierter nicht-invasiver Bestandserfassung, wie beispielsweise im Projekt BIMstocks erprobt wurde. Insbesondere soll die Forschung darauf abzielen, den Aufwand der Datenerhebung und -auswertung zu reduzieren sowie den Detailgrad der erhobenen Daten zu erhöhen. Ein weiterer Aspekt ist die Verbesserung der Anschlussfähigkeit zwischen BIM bzw. IFC-Datenstruktur und der GIS-basierte Datenstruktur des Materialkatasters, um damit eine korrekte Zusammenführung der Daten zu ermöglichen. Hierbei ist insbesondere eine Weiterentwicklung hinsichtlich der Anpassung bzw. Normierung der bestehenden BIM-Standards notwendig, da diese Fragestellung sich nicht nur auf die Materialkataster und IFC-Daten beschränkt, sondern auf die übergeordnete Integration der BIM und GIS Technologien.

Was sind die erforderlichen Rahmenbedingungen für die Etablierung der kreislauforientierten Planung?

Die Untersuchung der Herausforderungen der Planungspraxis und die darauf aufbauenden Handlungsempfehlungen zeigen auf, dass eine effektive Umsetzung der Kreislaufprinzipien in der Bauwirtschaft den Handlungsbedarf überwiegend auf einer strategisch-regulativen Ebene erfordert. Ein Handlungsfeld ist die Schaffung finanzieller Anreize durch steuerpolitische Maßnahmen und Förderungen, wie die Erhöhung des CO₂-Preises oder die Bereitstellung der Subventionen. Ein weiterer Aspekt ist die Ergänzung der Gesetze und Regelwerke, beispielsweise die Anpassung der Anforderungen der Bauordnung und der Umweltverträglichkeitsprüfung hinsichtlich der Kreislauffähigkeit der Projekte oder die Normierung der Instrumente wie des materiellen Gebäudepasses.

Eine kritische Betrachtung der formulierten Handlungsempfehlungen zeigt jedoch, dass die Umsetzung einiger Vorschläge neben Chancen für die Etablierung kreislauforientierter Ansätze auch Risiken birgt, insbesondere die Erhöhung der Komplexität des Planungs- und Bauprozesses.

Die Einführung des materiellen Gebäudepasses und die Festlegung der Kreislauffähigkeit als erforderliche Kriterien im Baubewilligungsverfahren könnten den Planungs- sowie den Datenaufbereitungsaufwand erhöhen und damit die Dauer und die Kosten des Planungsprozesses sowie des Baubewilligungsverfahrens steigern.

Die Anpassung der Schwellenwerte für Umweltverträglichkeitsprüfungen bei Städtebauvorhaben könnte ebenfalls zu höheren Kosten und einem größeren Zeitaufwand führen, da umfangreichere Studien und Analysen notwendig wären.

Darüber hinaus erfordert die Einführung neuer Instrumente und Parameter in die Planung eine höhere fachliche Qualifikation der Planer:innen, was letztendlich den Einsatz zusätzlicher finanzieller und zeitlicher Ressourcen notwendig macht. Daraus lässt sich schließen, dass die Umsetzung der Handlungsempfehlungen Abwägungen und möglicherweise die Entwicklung von Begleitmaßnahmen erfordern, um die möglichen Risiken zu mildern und die Akzeptanz und Wirksamkeit der Maßnahmen zu erhöhen.

Aus diesen Erkenntnissen lässt sich eine Schlussfolgerung hinsichtlich der formulierten These ziehen. Der Materialkataster erweist sich als ein umfassendes Planungstool, das verschiedene Technologien integriert und die Bearbeitung planerischer Fragestellungen auf mehreren Ebenen der kreislauforientierten Planung ermöglicht. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde jedoch festgestellt, dass die Etablierung der Kreislaufprinzipien in der Planungspraxis nicht nur eine integrierte Implementierung bestimmter Methoden oder Tools erfordert, sondern auch die Entwicklung von systemischen Maßnahmen auf der strategischen und regulativen Ebene zur Schaffung von notwendigen rechtlichen, ökonomischen und technischen Rahmenbedingungen. Unter diesen vernetzten Ansätzen gelingt der Weg zu einer ressourcenschonenden und ökologisch resilienten Stadtentwicklung.

8. QUELLEN

Achatz, A., Margelik, E., Romm, T., Kasper, T. & Jäger, D. (2021). Kreislaufbauwirtschaft: Projekt-Endbericht. Umweltbundesamt (Österreich).

Allesch, A., Laner, D., Roithner, C., Fazeni-Fraisl, K., Lindorfer, J., Moser, S., & Schwarz, M. (2018). Energie- und Ressourceneinsparung durch Urban Mining-Ansätze. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie.

Angehrn, P. (2024). Persönliches Interview im Rahmen der Diplomarbeit. [Interview geführt über Zoom-Call am 08.01.2024]

Angst, M., Feri, V., Oefner, A., Ott, C., Streiff, O., Zoller-Eckenstein, A. (2023). Merkblatt Wiederverwendung von Bauteilen. Büro Zirkular & ZHAW School of Management and Law. https://cirkla.ch/wp-content/uploads/2023/10/231006_Merkblatt_Wiederverwendung_final.pdf abgerufen am 13.04.2024

Bauordnung für Wien, Wiener Stadtentwicklungs-, Stadtplanungs- und Baugesetzbuch (Bauordnung für Wien – BO für Wien), LGBL. Nr. 11/1930 idF LGBL. Nr. 37/2023

Bergmann, P. (2022). Cradle-to-Cradle: Interview mit Dr. Patrick Bergmann von Madaster über zirkuläres Bauen [Interview]. BUWOG Podcast. <https://blog.buwog.com/cradle-to-cradle-interview-mit-dr-patrick-bergmann-von-madaster-ueber-zirkulaeres-bauen/> abgerufen am 24.09.2023

Binder, M. & Riegler-Floors, P. (2018). Einstoffliche Bauweisen. In Hillebrandt, A., Riegler-Floors, P., Rosen, A. & Seggewies, J. (Hrsg.), Atlas Recycling: Gebäude als Materialressource (S. 102-107). Detail.

Bindreiter, S., Forster, J., Fellner, J., Gassner, A., Lederer, J., Lorenz, W., Wurzer, G., Mitteregger, M., & Pöllauer, P. (2022). Materialressourcen der Stadt digitalisieren, analysieren und nachhaltig bewirtschaften: M-DAB. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK).

Borrmann, A., König, M., Koch, C. & Beetz, J. (2015). Building information modeling. Springer eBooks. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-05606-3>

Bott, H., & Siedentop, S. (2018). Herausforderung Regional -, Stadt - und Quartiersentwicklung. In: H. Bott, G. Grassl, & S. Anders (Hrsg.), Nachhaltige Stadtplanung: Lebendige Quartiere - Smart Cities - Resilienz (S. 33-42). Detail.

Böttge, J., Gantner, J., Haun, T., Özer, M., Sager, C., Schneider, D., Wittstock, B. (2018a). Herausforderung Stoffströme. In H. Bott, G. Grassl, & S. Anders (Hrsg.), Nachhaltige Stadtplanung: Lebendige Quartiere - Smart Cities - Resilienz (S. 108-113). Detail.

Böttge, J., Özer M., Schneider D., Wittstock B., (2018b). Herausforderung Stoffströme. In: H. Bott, G. Grassl, & S. Anders (Hrsg.), Nachhaltige Stadtplanung: Lebendige Quartiere - Smart Cities - Resilienz (S. 106-107). Detail.

Braungart M., McDonough W. (2014): Cradle-to-Cradle – Einfach intelligent produzieren. Piper Verlag.

Brunner, P. H. & Kral, U. (2013). Urban Mining und 'Letzte Senken': Schlüsselemente einer Smart City, In Smart City: Wiener Know-how aus Wissenschaft und Forschung (S. 248-255). Schmid Verlag.

buildingSMART (2024). Ökobilanzierung.

<https://ucm.buildingsmart.org/use-case-details/2397/de> abgerufen am 27.03.2024

Bundesamt für Umwelt BAFU (2023). Rückverteilung der CO₂-Abgabe.

<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/fachinformationen/verminderungsmassnahmen/co2-abgabe/rueckverteilung.html> abgerufen am 19.05.2024

BMK (Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie) (2022). Österreich auf dem Weg zu einer nachhaltigen und zirkulären Gesellschaft. Die österreichische Kreislaufwirtschaftsstrategie. BMK.

BVSE (2024). Qualitätsgesicherte Sekundärbaustoffe sind Rohstoffe der Zukunft.

<https://www.bvse.de/gut-informiert-mineralik/pressemitteilungen-mineralik/10591-qualitaetsgesicherte-sekundaerbaustoffe-sind-rohstoffe-der-zukunft.html> abgerufen am 14.05.2024

Callahan, A. (2017). Cradle-to-cradle: In conversation with William McDonough. Australian Design Review. <https://mcdonough.com/cradle-cradle-conversation-william-mcdonough/>

CORDIS (2017). Towards a circular economy: Eliminate waste through an open platform that facilitates material passports. <https://cordis.europa.eu/project/id/779024>

Cossu, R. & Williams, I. (2015). Urban mining: Concepts, terminology, challenges. In Waste Management, 45 (S. 1–3). <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.09.040>

Daxbeck H., Buschmann H., Gassner A., Kapfenberger-Pock A. (2015). Das anthropogene Lager in der Steiermark – Entwicklung eines Urban Mining Katasters. Projekt UMKAT. Ressourcen Management Agentur (RMA)

Dechantsreiter, U., Horst, P., Mettke, A., Asmus, S., Schmidt, S., Knappe, F., Reinhardt, J., Theis, S., & Lau, J. J. (2015). Instrumente zur Wiederverwendung von Bauteilen und hochwertigen Verwertung von Baustoffen. Umweltbundesamt (Deutschland).

DGNB (o.J.). Der Gebäude-ressourcenpass der DGNB. <https://www.dgnb.de/de/nachhaltiges-bauen/zirkulaeres-bauen/gebaeuderessourcenpass> abgerufen am 30.03.2024

Digitales Wien (2024). Brise – Die Zukunft der Verwaltung.

<https://digitales.wien.gv.at/projekt/brisevienna/> abgerufen am 13.03.2024

DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.). DIN EN 15804:2012. Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte. Deutsche Fassung EN 15804:2012+A2:2019 + AC:2021

Edlinger, M. (2024). Persönliches Interview im Rahmen der Diplomarbeit. [Interview geführt über Zoom-Call am 09.02.2024]

- Eichler, C.C., Schranz, C., Kruschmann, T., Urban, H., Hopferwieser, M., Fischer, S. (2024). BIMcert Handbuch – Grundlagenwissen openBIM. Ausgabe 2024. Mironde-Verlag, Niederfrohna, 2024. <https://doi.org/10.34726/5384>
- Eisenmenger, N., Dorninger, C., Kaufmann, L., Kalt, G., Perkovic, M., Fellner, J., Lederer, J., Lutter, S. (2022): CO₂- und Material-Fußabdruck für Wien. Eine Analyse der nachhaltigen Ressourcennutzung in Wien vor dem Hintergrund der Reduktionsziele in der Smart Klima City Strategie. Stadt Wien.
- Eisenmenger, N., Plank, B., Milota, E., Gierlinger, S., (2020). Ressourcennutzung in Österreich 2020. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)
- Enargus (o.J) Sekundärrohstoff. https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/d11359-2/*/*Sekund%c3%a4rohstoff?op=Wiki.getwiki abgerufen am 14.05.2024
- Escalante, N. & Hafner, G. (2017). Stoffstrommanagement und Ökobilanzen. In Kranert, M. (Hrsg.) Einführung in die Kreislaufwirtschaft (5. Auflage). Springer Vieweg. https://doi.org/10.1007/978-3-8348-2257-4_14
- ESRI (2024). BIM-Daten in der Geoverarbeitung. <https://pro.arcgis.com/de/pro-app/latest/help/data/revit/bim-data-in-geoprocessing.htm> abgerufen am 27.03.2024
- Europäisches Parlament (2023). Kreislaufwirtschaft: Definition und Vorteile. <https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/economy/20151201STO05603/kreislaufwirtschaft-definition-und-vorteile> abgerufen am 27.10.2023
- Fischli-Boson, P. (2021). Zirkuläre Tragstrukturen. In E. Stricker, G. Brandi, A. Sonderegger, M. Angst, B. Buser, & M. Massmünster (Hrsg.), Bauteile wiederverwenden: ein Kompendium zum zirkulären Bauen (S. 111-127). Park Books.
- Gebetsroither, M., Honic, M., Kovacic, I., Löffler, C., Marx, K., Pamminer, R., Robbi, S., Sustr, C., Schützenhofer, S. & Weber, G. (2024). Paradigmenwechsel in Bau- und Immobilienwirtschaft. In Essentials. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-68276-0>
- Geertman, S., Stillwell, J. & Toppen, F. (2013). Introduction to 'Planning Support Systems for Sustainable Urban Development'. In Lecture notes in geoinformation and cartography, (S. 1–15).
- Giffinger, R., Redlein, A., Kalasek, R., Pühringer, F., Brugger, A., Kammerhofer, A. & Kerschbaum, P. (2021). Digitalisierung in der Stadtplanung: Von der Raumplanung bis zur Digitalisierung im Bauwesen. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie Mobilität, Innovation und Technologie (BMK).
- Gugerli, H., Lenel, S., & Sintzel, B. (2015). Gesund und ökologisch bauen mit Minergie-Eco. Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut Energie am Bau (Hrsg.).
- Hebel, D. E. & Heisel, F. (2022). Prinzipien des kreislaufgerechten Bauens. In Hebel, D. E. & Heisel, F. (Hrsg.), Besser - weniger - anders bauen: kreislaufgerechtes Bauen und Kreislaufwirtschaft (S. 22-23). Birkhäuser.

- Heisel, F. & Rau-Oberhuber, S. (2020). Calculation and evaluation of circularity indicators for the built environment using the case studies of UMAR and Madaster. *Journal of Cleaner Production*, 243, 118482. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118482>
- Hillebrandt, A. (2018). Architekturkreisläufe – Urban Mining Design. In Hillebrandt, A., Riegler-Floors, P., Rosen, A. & Seggewies, J. (Hrsg.), *Atlas Recycling: Gebäude als Materialressource* (S. 10-15). Detail.
- Hillebrandt, A. & Seggewies, J.-K. (2018). Recyclingpotenziale von Baustoffen. In *Atlas Recycling: Gebäude als Materialressource* (S. 58-101). Detail.
- Hillebrandt, A., Riegler-Floors, P., Rosen, A. & Seggewies, J. (2018). *Atlas Recycling: Gebäude als Materialressource*. Detail.
- Hillebrandt, A. (2021). Kreisläufe schließen. In D. E. Hebel & F. Heisel (Hrsg.), *Urban Mining und kreislaufgerechtes Bauen* (S. 59-64). Fraunhofer IRB-Verlag.
- Kammer der Ziviltechniker:innen Arch+Ing | Tirol und Vorarlberg. (o. J.). Leistungsmodelle & Vergütungsmodelle. <https://www.kammerwest.at/kammerwest/honorare-vertraege-recht/lm-vm/> abgerufen am 23.04.2024
- Kirchherr, J., Reike, D. & Hekkert, M. P. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation And Recycling*, 127 (S. 221–232). <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- Kirchner, E. (2020). *Werkzeuge und Methoden der Produktentwicklung*. Springer eBooks.
- Kovacic, I., Honic, M., Rechberger, H., Oberwinter, L., Lengauer, K., Hagenauer, A., Glöggler, J., Meier, K. (2019). *Prozess-Design für den ‚Building Information Modeling‘ (BIM) basierten, materiellen Gebäudepass – BIMaterial*. BMK.
- Lechner, P., Netsch, S., Schüll, E., & Vallaster, C. (2022). *Kreislaufwirtschaft und Stadtplanung: Urbane Stadtentwicklung durch Partizipation am Beispiel Hallein (Salzburg)*.
- Lechner, H. (2023a). Leistungsmodell Objektplanung - Architektur [LM.OA.]. PMTools Software-Seminare-Verlag 2023 https://www.arching.at/fileadmin/user_upload/redakteure/LM_VM_2014/LM2023-Objektarchitektur.pdf abgerufen am 17.05.2024
- Lechner, H. (2023b). Leistungsmodell Bauphysik + Nachhaltigkeit [LM.BP+NH]. PMTools Software-Seminare-Verlag 2023 https://www.arching.at/fileadmin/user_upload/redakteure/LM_VM_2014/LM2023-Bauphysik_und_Nachhaltigkeit.pdf abgerufen am 17.05.2024
- Lederer, J., Gassner, A., Kleemann, F. & Fellner, J. (2020). Potentials for a circular economy of mineral construction materials and demolition waste in urban areas: a case study from Vienna. *Resources, Conservation and Recycling*, 161, 104942.
- Lederer, J., Fellner, J., Gassner, A., Gruhler, K. & Schiller, G. (2021). Determining the material intensities of buildings selected by random sampling: A case study from Vienna. *Journal Of Industrial Ecology*, 25(4) (S. 848–863). <https://doi.org/10.1111/jiec.13100>

- Lederer, J., Laner, D. & Fellner, J. (2014). A framework for the evaluation of anthropogenic resources: The case study of phosphorus stocks in Austria. *Journal of Cleaner Production*, 84, (S. 368–381). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.078>
- LUBW (Landesamt für Umwelt Baden-Württemberg) (2024). Grundsätze des Zirkulären Bauens: Reduce – Reuse – Recycle. <https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/blog/-/blogs/grundsätze-des-zirkulären-bauens-reduce-reuse-recycle> abgerufen am 13.04.2024
- Luger, B., & Dorau, U. (2021). Circular Housing. Ansätze zur Verankerung der Prinzipien kreislauffähigen Bauens im Wohnungsneubau. UIV Urban Innovation Vienna.
- Luger, B., & Rauh, L. (2020). Kreislauffähiges Bauen: Die Rolle der Stadtplanung im integralen Planungsprozess. UIV Urban Innovation Vienna.
- Macho, V. (2024). Persönliches Interview im Rahmen der Diplomarbeit. [Interview geführt am 25.01.2024 in Wien]
- Madaster (2021). Madaster Benutzerhandbuch. Allgemeines Benutzerhandbuch der Madaster-Plattform. Version 1.0, Datum 16.4.2021.
- Madaster (2024). Finanziell. <https://docs.madaster.com/de/de/platform-pages/building/financial.html> abgerufen am 21.05.2024
- Madaster (2022). International Team Madaster. <https://madaster.ch/neuigkeiten/internationale-markteinfuehrung-madaster/> abgerufen am 24.09.2023
- Mettke, A., Schmidt, S., & Jacob, S. (2015). Dokumentation zum Einsatz von ressourcenschonendem Beton beim ‚Neubau des Forschungs- und Laborgebäudes für Lebenswissenschaften der Humboldt-Universität zu Berlin‘ in Berlin-Mitte. Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt, Referat Abfallwirtschaft.
- Meuser M. & Nagel U. (1991). ExpertInneninterviews - vielfach erprobt, wenig bedacht: ein Beitrag zur qualitativen Methodendiskussion. In Garz, D. & Kraimer, K. (Hrsg.), *Qualitativ-empirische Sozialforschung: Konzepte, Methoden, Analysen* (S. 441-471). VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Mulhall, D., Hansen, K., Luscuere, L., Zanatta, R., Willems, R., Boström, J., Elfström, L., Heinrich, M., Lang, W. (2017). Framework for Materials Passports. Extract from an Internal BAMB Report. BAMB Consortium, EPEA, SundaHus.
- Müller, F., Lehmann, C., Kosmol, J., Keßler, H., & Bolland, T. (2017). Urban Mining – Ressourcenschonung im Anthropozän. Umweltbundesamt (Deutschland).
- Neubauer, C., Bernhardt, A., Brandstätter, C., Broneder, C., Kral, U., Oliva, J., Roll, M., Schaffernak, A., Stoifl, B., Tesar, M., Tista, M., Walter, B., & Weißenbach, T. (2023). Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich. Statusbericht 2023 für das Referenzjahr 2021 (Stand: 4. August 2023). Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie.
- Oefner, A., Wiskemann, B., Mambourg, M., Deiss, N. (2022). "Le Fil Rouge": Kreislaufwirtschaft. <https://www.muehlemattbelp.ch/blog/le-fil-rouge-kreislaufwirtschaft/> abgerufen am 13.04.2024

- OIB (Österreichisches Institut für Bautechnik). (o.J.). OIB-Richtlinien. <https://www.oib.or.at/de/oib-richtlinien> abgerufen am 21.04.2024
- OIB (Österreichisches Institut für Bautechnik). (2023). Grundlagendokument zur Ausarbeitung einer OIB-Richtlinie 7 Nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen. Ausgabe Mai 2023.
- Österreichisches Normungsinstitut (2013). ÖNORM 1800:2013 08 01. Ermittlung von Flächen und Rauminhalten von Bauwerken und zugehörigen Außenanlagen.
- Österreichisches Normungsinstitut (2022). ÖNORM 3151:2022 01 01. Rückbau von Bauwerken als Standardabbruchmethode.
- Österreichisches Normungsinstitut (2011). ÖNORM EN 15221-6:2011 12 01. Facility Management - Teil 6: Flächenbemessung im Facility Management.
- Ponn, J. & Lindemann, U. (2008). Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte. In Springer eBooks.
- Potting, J., Hekkert, M., Worrell, E., & Hanemaaijer, A. (2017). Circular Economy: Measuring innovation in the product chain - Policy report. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency
- RBV 2016, Recycling-Baustoff Verordnung 2016, Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über die Pflichten bei Bau- oder Abbruchtätigkeiten, die Trennung und die Behandlung von bei Bau- oder Abbruchtätigkeiten anfallenden Abfällen, die Herstellung und das Abfallende von Recycling-Baustoffen, BGBl. II Nr. 181/2015 idF BGBl. II Nr. 290/2016
- Reisinger, H., Buschmann, H., Walter, B., Lixia, R., & Daxbeck, H. (2014). Gebäudepass: Erarbeitung von Grundlagen für die Standardisierung von Gebäudepässen als Gebäudematerialinformationssystem. Umweltbundesamt (Österreich).
- Reike, D., Vermeulen, W. J. & Witjes, S. (2018). The circular economy: New or Refurbished as CE 3.0? – Exploring Controversies in the Conceptualization of the Circular Economy through a Focus on History and Resource Value Retention Options. Resources, Conservation And Recycling, 135, (S. 246–264). <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.027>
- Richthofen, A. von, Zeng, W., Asada, S., Burkhard, R., Heisel, F., Müller Arisona, S., & Schubiger, S. (2017). Urban Mining: Visualizing the Availability of Construction Materials for Re-use in Future Cities. In 2017 21st International Conference Information Visualisation (IV) (S. 306-311). <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000225879>
- Romm, T. M. & Kasper T. (2018). Ökoeffizientes Bauen mit Ressourcen vor Ort. In Hillebrandt, A., Riegler-Floors, P., Rosen, A. & Seggewies, J. (Hrsg.), Atlas Recycling: Gebäude als Materialressource (S. 36-39). Detail.
- Romm, T. M. (2024). Persönliches Interview im Rahmen der Diplomarbeit. [Interview geführt über Zoom-Call am 15.01.2024]
- Rosen A., (2021). Urban Mining Index: Entwicklung einer Systematik zur quantitativen Bewertung der Kreislaufkonsistenz von Baukonstruktionen in der Neubauplanung. Fraunhofer IRB Verlag.

- Schadow, T. (2021). Ressourcenschonung im Bauwesen – Aspekte aus der Planungspraxis. *Bautechnik*, 99(1) (S. 50–56). <https://doi.org/10.1002/bate.202100110>
- Schiller, G., Lehmann, I., Gruhler, K., Hennersdorf, J., Lützkendorf, T., Mörmann, K., Knappe, F., Muchow, N., & Reinhardt, J. (2022). Abschlussbericht: Kartierung des anthropogenen Lagers IV: Erarbeitung eines Gebäudepass- und Gebäudekatasterkonzepts zur regionalisierten Erfassung des Materialhaushaltes mit dem Ziel der Optimierung des Recyclings - Konzepte für Materialinventare und -kataster. Umweltbundesamt (Deutschland).
- Schneider, D. (2020). Cradle-to-Cradle®- inspirierte Smart City. In C. Etezadzadeh (Hrsg.), *Smart City – made in Germany: Die Smart-City-Bewegung als Treiber einer gesellschaftlichen Transformation* (S. 455-463). Springer-Verlag.
- Schnitzer, B. C. (2021). Geodateninfrastrukturen als Datenvehikel für ein „Urban Mining Kataster“ (Dissertation). Technische Universität Darmstadt.
- Schranz C., Gerger A., Fischer S., Urban H. (Hrsg.) (2021). Digitalisierung und Standardisierung der Immobilienwirtschaft unter Anwendung von BIM am Beispiel eines Neubaus: Bio-Institut der HBLFA Raumberg-Gumpenstein. Endbericht von buildingSMART Austria. Wien: TU Verlag
- Smart City Charta (2021). Smart City Charta. Digitale Transformation in den Kommunen nachhaltig gestalten. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI) (Hrsg.)
- Stadt der Zukunft (2023). Digitales Planen, Bauen und Betreiben. <https://nachhaltigwirtschaften.at/de/sdz/themen/digitales-planen-bauen-betreiben.php>
- Stadt Wien (2022). Smart Klima City Strategie Wien. Der Weg zur Klimamusterstadt. Magistrat der Stadt Wien.
- Stadt Wien (o.J.). VIE.CYCLE – zirkuläres Bauen. <https://viecycle.wien.gv.at/> abgerufen am 20.05.2024
- Stadt Zürich (2009). Ressourcenstrategie ‚Bauwerk Stadt Zürich‘. Stadt Zürich.
- Stadtwende (2023). Glossar – Planungsinstrument. <https://stadtwende.de/glossar/planungsinstrument/> abgerufen am 09.08.2023
- STRABAG. (o. J.). Nachhaltiger bauen: CO₂-reduzierter Beton. <https://work-on-progress.strabag.com/de/co2-emissionen/co2-reduzierter-beton> abgerufen am 20.04.2024
- Stumpf, L., Baumgartner, R. (2022). Die Circular Economy – ein Konzept mit vielen Perspektiven. In Böckel, A., Quaing, J., Weissbrod, I., & Böhm, J. (Hrsg.) *Mythen der Circular Economy* (S. 5-11). Bertelsmann Stiftung.
- Sustr, C. (2024). Persönliches Interview im Rahmen der Diplomarbeit. [Interview geführt am 25.01.2024 in Wien]
- Tercero Espinoza, L., Rostek, L., Loibl, A., Stijepic, D. (2020). The promise and limits of Urban Mining. Fraunhofer ISI.

Ullrich, P. (2006). Das explorative ExpertInneninterview: Modifikationen und konkrete Umsetzung der Auswertung von ExpertInneninterviews nach Meuser/Nagel. In Engartner, T., Kuring, D., Teubl, T. (Hrsg.), Die Transformation des Politischen: Analysen, Deutungen und Perspektiven; siebentes und achtes DoktorandInnenseminar der Rosa-Luxemburg-Stiftung (S. 100-109). Dietz

Umweltbundesamt (2019). Zwölfter Umweltkontrollbericht. Umweltsituation in Österreich. <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0684.pdf> abgerufen am 20.05.2024

Umweltbundesamt Deutschland (2017). Stadtentwicklung. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/nachhaltigkeit-strategien-internationales/planungsinstrumente/umweltschonende-raumplanung/stadtentwicklung> abgerufen am 05.04.2024

Umweltbundesamt Deutschland (o.J). Umweltthesaurus: Anthropogenes Lager. https://sns.uba.de/umthes/de/concepts/_f6c8d245.html abgerufen am 15.05.2024

Umweltdatenbank. Das Umwelt-Lexikon: Sekundärrohstoff. <https://www.umweltdatenbank.de/cms/lexikon/45-lexikon-s/1437-sekundaerrohstoff.html> abgerufen am 14.05.2024

Umweltdialog (2021). Gemeinsam für die Ressourcenwende in der Bau- und Immobilienwirtschaft. <https://www.umweltdialog.de/de/wirtschaft/circular-economy/2021/Gemeinsam-fuer-die-Ressourcenwende-in-der-Bau-und-Immobilienwirtschaft.php> abgerufen am 24.09.2023

UVP-G 2000, Bundesgesetz über die Prüfung der Umweltverträglichkeit (Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz 2000 – UVP-G 2000), BGBl. Nr. 697/1993 idF BGBl. I Nr. 26/2023

van den Berg M., Voordijk H. & Adriaanse A. (2021). BIM uses for deconstruction: an activity-theoretical perspective on reorganising end-of-life practices, Construction Management and Economics, 39:4, (S. 323-339). <https://doi.org/10.1080/01446193.2021.1876894>

Verbücheln, M., Pichl, J., Bunzel, A., Jolk, A., Buchert, M., Dolega, P. (2021). Stadtplanung und Stadtentwicklung als Hebel für den Ressourcen- und Klimaschutz (2. Auflage). Umweltbundesamt (Deutschland).

Verbücheln, M. (2021): Ressourcenschutz durch Stadtplanung und Stadtentwicklung. Umweltbundesamt (Deutschland).

Vonk, G. A. (2006). Improving planning support: The Use of Planning Support Systems for Spatial Planning. Netherlands Geographical Studies.

Wasser 3.0. (2023). Kreislaufwirtschaft: Intelligente Produktions-, Verwendungs- und Abfallwege für Umwelt und Gesellschaft. <https://wasserdreinull.de/wissen/wasser/kreislaufwirtschaft/> abgerufen am 27.10.2023

WBGU – Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (2016). Der Umzug der Menschheit: Die transformative Kraft der Städte (2. Auflage). WBGU.

Weidner, S., Mrzigod, A., Bechmann, R. & Sobek, W. (2021). Graue Emissionen im Bauwesen – Bestandsaufnahme und Optimierungsstrategien. Beton- und Stahlbetonbau, 116(12) (S. 969–977). <https://doi.org/10.1002/best.202100065>

Weiland, R. (1995). Stoffpolitik in einer Kreislaufwirtschaft. *Wirtschaftsdienst*, 75(3), (S. 149-155).

Wiegand, D. (2016). Vor dem Recycling ist nach dem Recycling. In *Schweizer Energiefachbuch 2016* (S. 8-11). Kömedia AG. <http://hdl.handle.net/20.500.12708/28961>

Wilhelm, L., Donaubaauer, A., & Kolbe, T. H. (2021). Integration of BIM and Environmental Planning: The CityGML EnvPlan ADE. *Journal of Digital Landscape Architecture*, 6-2021 (S. 332-343). doi:10.14627/537705030

Wilts, H., & Berg, H. (2018). Digitale Kreislaufwirtschaft: die digitale Transformation als Wegbereiter ressourcenschonender Stoffkreisläufe. In *brief 04/2017 | Wuppertal Institut*.

WKO (Wirtschaftskammer Österreich). (2023). CO₂-Bepreisung: Fragen und Antworten zur Einführung der Abgabe auf CO₂-Emissionen. <https://www.wko.at/oe/industrie/mineraloelindustrie/co2-bepreisung> abgerufen am 19.05.2024

Wolf, G. (2022). Branchenbericht Bauwirtschaft. UniCredit Bank Austria AG. <https://www.bankaustria.at/wirtschaft-oesterreich-branchenberichte.jsp> abgerufen am 27.10.2023

Wolman, A. (1965). The metabolism of cities. *Scientific American*, 213(3) (S. 178–190). <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0965-178>

Zabek M. & Quaing J., (2022). Die Circular Economy – ein Konzept mit vielen Perspektiven. In Böckel, A., Quaing, J., Weissbrod, I., & Böhm, J., *Mythen der Circular Economy* (S. 75-79). Bertelsmann Stiftung. <https://www.bertelsmann-stiftung.de/de/publikationen/publikation/did/mythen-der-circular-economy>

Zhu, X. (2014). GIS and urban mining. *Resources*, 3(1), (S. 235–247).

Zilch, K., Diederichs, C. J., Katzenbach, R. & Beckmann, K. J. (2014). *Konstruktiver Ingenieurbau und Hochbau*. Springer-Verlag.

WEITERE QUELLEN

Symbole geoZwilling, Gebäudepass (Abbildungen 39, 57, 62): Stadt Wien (2022). *Smart Klima City Strategie Wien*. Der Weg zur Klimamusterstadt. Magistrat der Stadt Wien.

Icons: Miro. www.miro.com abgerufen am 21.05.2024

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: EU-Recyclingziele für verschiedene Abfallfraktionen und Recyclingquoten in Österreich im Jahr 2016 u. 2018. Quelle: Umweltbundesamt, 2019: S. 168	2
Abbildung 2: Zusammenhang zwischen Maßnahmen im urbanen Raum und natürlichen Ressourcen. Quelle: Verbücheln et al. 2021: S. 13, ergänzt durch eigene Darstellung: Prozesselement „Digitale Tools“	5
Abbildung 3: Prozesskette - Planen, Bauen und Betreiben. Quelle: BMK, 2018, zitiert in Stadt der Zukunft, 2023	9
Abbildung 4: Prozesskette Planen-Bauen-Betreiben und Ressourcenkreislauf. Eigene Darstellung anlehnend an Giffinger et al., 2021	10
Abbildung 5: Exemplarische Stoffströme in der Stadt. Quelle: Böttge et al., 2018a	14
Abbildung 6: Stoffstrommanagement und Abfallwirtschaft. Quelle: Escalante & Hafner, 2017: S. 691	15
Abbildung 7: Zeitliche Aspekte der Stoffströme. Eigene Darstellung anlehnend an Böttge et al., 2018a	16
Abbildung 8: Produktionsbasierter Materialverbrauch 2010 und 2019. Quelle: Eisenmenger et al. 2022: S. 55	18
Abbildung 9: konsumbasierter Materialfußabdruck für Jahre 2010 und 2019. Quelle: Eisenmenger et al., 2022: S. 55	19
Abbildung 10: CO ₂ -Emissionen in Wien in Jahren 2010 bis 2019. Quelle: Eisenmenger et al., 2022: S. 44	19
Abbildung 11: Konsumbasierter CO ₂ -Fußabdruck nach sektoralen Hotspots in Wien in Jahren 2010 bis 2019. Quelle: Eisenmenger et al. 2022: S. 55	20
Abbildung 12: Indikatoren des Bausektors nach Materialkategorien. Quelle: Eisenmenger et al. 2022: S. 67-72	21
Abbildung 13: Zusammensetzung des Gesamtabfallaufkommens im Jahr 2021 nach Abfallgruppen, in %. Quelle: Umweltbundesamt, 2022, zitiert in Neubauer et al. 2023: S. 19	22
Abbildung 14: Entwicklung des Aufkommens von Bau- und Abbruchabfällen 2017–2021. Quelle: Neubauer et al. 2023 / Umweltbundesamt	23
Abbildung 15 (links): Baukonjunktur in Österreich von 2015 bis 2022. Quelle: Wolf, 2022 / Statistik Austria, Eurostat, UniCredit Research	23
Abbildung 16 (rechts): Produktionshindernisse der Bauwirtschaft in Österreich von 2017 bis 2021. Quelle: Wolf, 2022 / Eurostat, UniCredit Research	23
Abbildung 17: Stoffstrombild für Bau- und Abbruchabfällen (Referenzjahr 2021, in t). Quelle: Umweltbundesamt (2022), zitiert in Neubauer et al. 2022: S. 220	24
Abbildung 18: Konzepte der Linearwirtschaft, Recycling-Wirtschaft, Kreislaufwirtschaft. Quelle: Wasser 3.0	27
Abbildung 19: Überblick über die Zielbereiche und Maßnahmen der Smart City Strategie der Stadt Wien in Bezug auf die Kreislaufwirtschaft im Bausektor. Quelle: Eigene Zusammenfassung und Darstellung basierend auf Stadt Wien, 2022	30
Abbildung 20: Biotischer und technischer Verwertungskreislauf im Kontext der Bauwirtschaft. Quelle: Hillebrandt & Seggewies, 2018: S. 60	33
Abbildung 21: Hierarchie der R-Strategien. Eigene Darstellung anlehnend an Luger & Dorau, 2021 und Hillebrandt, 2018	34

Abbildung 22: Konzepte der Wieder- und Weiterverwendung von Bauteilen. Quelle: Oefner et al., 2024	36
Abbildung 23: R-Strategien der Kreislaufwirtschaft auf der Baustelle: Reduce, Reuse, Recycle. Quelle: Romm & Kasper, 2018	37
Abbildung 24: Einordnung des Urban Mining in den Kontext der Kreislaufwirtschaft und Ressourcengewinnung. Quelle: Cossu & Williams, 2015: S. 1, eigene Übersetzung und grafische Anpassung	38
Abbildung 25: Materialflüsse zwischen natürlichen und anthropogenen Ressourcenquellen. Quelle: Cossu & Williams, 2015: S. 2, eigene Übersetzung	39
Abbildung 26: Urbane Minen und deren Abbaupotenzial. Eigene Darstellung auf Basis von: Schnitzer, 2021: S. 56 (Urbane Minen) und McKelvey, 1976; Kral et al., 2017, zitiert in Allesch et al., 2018: S. 21 (Ressourcen und Reserven)	40
Abbildung 27: Abhängigkeit der Stoffkreisläufe auf unterschiedlichen räumlichen und planerischen Ebenen. Quelle: Schneider, 2021	43
Abbildung 28: Schichtenmodell des Gebäudes. Quelle: Brand, 1994	43
Abbildung 29: Räumliche Datenbank für die Fragestellungen des Urban Mining. Quelle: Zhu, 2014: S. 237	49
Abbildung 30: GIS-Anwendungsfälle im Urban Mining. Quelle: Zhu, 2014: S. 239	49
Abbildung 31: BIM Anwendungen im Gebäudelebenszyklus. Quelle: Borrmann et al., 2015: S. 4 ..	51
Abbildung 32: Entwicklungsstufen von BIM. Quelle: Eichler et al., 2024: S. 64	52
Abbildung 33: Methode für die Erstellung des materiellen Gebäudepass. Quelle: Kovacic et al., 2019, S. 21	55
Abbildung 34: Gebäuderessourcenpass der DGNB für ein Bestandsgebäude in der vollständigen Fassung. Quelle: DGNB, 2024	57
Abbildung 35: Kriterien zur Typologisierung von Bauwerken. Quelle: Schiller et al., 2022: S. 184 ..	60
Abbildung 36: Darstellung des Materialkatasters UMKAT auf Basis des 3D-Stadtmodells. Quelle: Daxbeck et al., 2015: S. 133	61
Abbildung 37: Materialkataster UMKAT auf Basis des 3D-Stadtmodells. Einzelbauwerkbetrachtung inkl. Auswertung. Quelle: Daxbeck et al. 2015: S. 134.....	61
Abbildung 38: Visualisierung der Mengen zementgebundener Baustoffe (links) und keramischer Baustoffe (rechts) als Choropletenkarten. Quelle: Daxbeck et al., 2015: S. 138, S. 138	62
Abbildung 39: Integration der Materialinventare und der regionalen Materialkataster in einem Informationsmanagementsystem. Eigene Darstellung auf Basis von Schiller et al., 2022	65
Abbildung 40: Funktionales, struktureles und hierarchisches Konzept zur Modellierung von Systemen. Quelle: Freund, 2018, zitiert in Kirchner, 2020.....	74
Abbildung 41: Screenshot der Plattform BIMstocks. Dreidimensionale Darstellung des Gebäudes sowie der zugehörigen Materialmengen nach Kategorien und nach Geschoßen. Quelle: Honic et al., 2023: S. 48	88
Abbildung 42: Screenshot der Plattform Madaster. Visualisierung des IFC-Modells und der Bauteilinformationen im BIM-Viewer der Plattform Madaster. Eigener Screenshot.	89
Abbildung 43: Screenshot der Plattform M-DAB. Dreidimensionale Visualisierung der prognostizierten Materialmengen für das Jahr 2027 auf der Stadtebene mit Gliederung nach Bezirken. Quelle: Bindreiter et al., 2022: S. 25	89
Abbildung 44: Screenshot der Plattform Madaster. Visualisierung des Objektstandortes auf Basis der OSM-Karte. Der Polygon lässt die Daten der sich darin befindenden Objekte aggregieren und die Daten grafisch abzubilden. Eigener Screenshot.....	90

Abbildung 45: Screenshot der Plattform M-DAB. Darstellung der Materialflüsse als Materialinput und Materialoutput für das Jahr 2020 in Form eines Sankey-Diagramms. Quelle: Bindreiter et al., 2022: S. 26	90
Abbildung 46: Screenshot der Plattform Madaster. Darstellung der materiellen Zusammensetzung des Gebäude und die Zugehörigkeit der Materialfamilien den Gebäudeschichten. Eigener Screenshot.....	91
Abbildung 47: Screenshot der Plattform Madaster. Darstellung der Berechnungsergebnisse des Indikators "Zirkularität" für das Beispielprojekt. Eigener Screenshot.	94
Abbildung 48: Screenshot der Plattform Madaster. Darstellung der Materialströme nach Lebenszyklusphasen des Gebäudes. Eigener Screenshot.	94
Abbildung 49: Screenshot der Plattform Madaster. Darstellung der Berechnungsergebnisse des Indikators Embodied Carbon für das Beispielprojekt (ganzes Gebäude). Eigener Screenshot.	96
Abbildung 50: Screenshot der Plattform Madaster. Darstellung der Berechnungsergebnisse des Indikators Embodied Carbon für das Beispielprojekt (Berechnungen für Gebäudeschichten). Eigener Screenshot.	96
Abbildung 51: Geschoß- und Bauflächenpotenziale (>550 m ² Grundfläche) je Baublock in Wien. Quelle: Bindreiter et al., 2022: S. 49	97
Abbildung 52: Abrissvulnerabilität der Wohngebäude. Quelle: Bindreiter et al., 2022: S. 34	98
Abbildung 53: Simulationsmodell mit Visualisierungsumgebung der Plattform M-DAB. Quelle: Bindreiter et al., 2022.....	99
Abbildung 54: Dashboard der Plattform Madaster mit der Darstellung der Materialwerte des Gebäudes. Eigener Screenshot.....	100
Abbildung 55: Zuordnung der Erkenntnisse der funktionalen Analyse zu den Elementen des gesamtheitlichen Konzeptes des Materialkatasters als Informationsmanagementsystems. Eigene Darstellung anlehnend an Schiller et al., 2022.....	102
Abbildung 56: Referenzmodell eines idealtypischen Materialkatasters. Eigene Darstellung.....	105
Abbildung 57: Generalisierter Ablauf des Datenbeschaffungsprozesses in einem idealtypischen Materialkataster. Eigene Darstellung.....	106
Abbildung 58: Generalisierter Ablauf der Funktionen der Datenverwaltung in einem idealtypischen Materialkataster. Eigene Darstellung.....	109
Abbildung 59: Mögliche Modalität des Datenzugriffs in einem idealtypischen Materialkataster. Eigene Darstellung.....	110
Abbildung 60: Generalisierter Ablauf der analytischen Funktionen auf der Stadtebene in einem idealtypischen Materialkataster. Eigene Darstellung.....	111
Abbildung 61: Generalisierter Ablauf der analytischen Funktionen auf der Gebäudeebene in einem idealtypischen Materialkataster. Eigene Darstellung.....	112
Abbildung 62: Generalisierter Ablauf der Funktionen der Visualisierung und Kommunikation in einem idealtypischen Materialkataster. Eigene Darstellung.....	113

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Übersicht der verfügbaren Daten, Materialgruppen, Einheiten der Materialmengen und Aggregationsebenen der Plattformen M-DAB, BIMstocks und Madaster. Eigene Zusammenfassung nach Bindreiter et al., 2022; Honic et al., 2023; Plattform Madaster	86
---	----

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst habe. Alle verwendeten Hilfsmittel und Quellen sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin / einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachterinnen / Begutachtern beurteilten Arbeit überein.

Ort und Datum

Unterschrift